第 41 卷　第 2 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 41,　No. 2
2023 年 6 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Jun., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.02.04

第三代国际天球参考架

姜　男[1,2]，刘佳成[1,2]，朱　紫[1,2]，刘　牛[1,2,3]

(1. 南京大学 天文与空间科学学院，南京 210023；　2. 南京大学 教育部现代天文与天体物理重点实验室，南京 210023；　3. 南京大学 地球科学与工程学院，南京 210023)

摘要： 第三代国际天球参考架 (the 3rd realization of the International Celestial Reference Frame, ICRF3) 于 2019 年 1 月 1 日起，代替其前代参考架第二代国际天球参考架 (the 2nd realization of the International Celestial Reference Frame, ICRF2) 成为最新的国际天球参考架，与国际天球参考系 (the International Celestial Reference System, ICRS) 在 ICRF2 的误差范围内指向一致。ICRF3 发表后，在诸多领域中都发挥着至关重要的作用。ICRF3 的新特点也给其数据的使用带来了影响。详细介绍 ICRF3 的基本性质，并对 ICRF3 的使用方法进行说明，还将 ICRF3 内部三个波段参考架，以及 ICRF3 与 Gaia-CRF3 进行了比较，检验了 ICRF3 参考架的稳定性，讨论了其中可能存在的系统误差。

关　键　词： 参考架；干涉测量；银河系；自行

中图分类号： P129　　　　**文献标识码：** A

1　天球参考架

在天文学、地球科学等领域众多研究中，想要说明物体的位置分布、运动状态或者描述某一正在发生的事件，都需要得知研究对象在某时刻下的位置信息。而位置信息要相对于某一参考系才能描述。天文学中主要使用两类参考系：地球参考系 (Terrestrial Reference System, TRS) 和天球参考系 (Celestial Reference System, CRS)。

实际天文学研究中，为了使得目标源的位置坐标可以测量，需要利用一组源在研究时刻的位置来反映对应的天球参考系，即将天球参考系具体化。利用目标源和参考源的相对位置以及参考源的绝对位置来得到目标源的绝对位置。天球参考系的实现即天球参考架 (Celestial Reference Frame, CRF)，它可以是一组射电源的星表，一组恒星的星表，也可以是行星和恒星的运动历表。为了更方便地描述和研究天体的位置和运动，人们希望理想的天球参考系是一个惯性系统。几乎所有天球参考架都是对这一理想天球参考系的近似。

收稿日期： 2022-04-25；　**修回日期：** 2022-06-28

资助项目： 国家自然科学基金 (11833004, 12103026)；中国博士后科学基金 (2021M691530)

通讯作者： 刘佳成，jcliu@nju.edu.cn

由射电观测河外源实现的国际天球参考架 (the International Celestial Reference Frame, ICRF) 出现之前，普遍使用的参考架是第五代基本星表 (the Fifth Fundamental Catalog of Stars, FK5)[1]。它位于光学波段，包含了 1 535 颗明亮恒星的位置和自行信息。FK5 相对河外射电参考架存在 0.7 $\mathrm{mas\cdot a^{-1}}$ 的旋转[2]。由于恒星距离我们较近，位置变化不可忽略，恒星运动信息的测量精度也会影响恒星参考架的精度。此外，FK5 参考架中，恒星自行、银河系旋转和参考架的非惯性旋转三者无法完全区分开。并且，FK5 的基本平面是 J2000.0 的平赤道面，X 轴方向为 J2000.0 平春分点；因此参考系的基本平面与地球的岁差-章动密切相关，岁差常数的误差也会导致恒星位置和自行存在系统差，进而导致参考架的旋转。

为了解决这些问题，需要寻找其他天体作为参考架指向的参考点。河外源距离地球很远，可以认为在目前观测精度下，它们不会产生可以被观测到的运动。且利用河外源位置信息建立参考架时，不再依赖赤道面和春分点，即与太阳系动力学和地球岁差-章动不再有关，能够更好地实现惯性参考系。我们将这种相对银河系外遥远天体无旋转的参考架，称为准惯性天球参考架[3]。鉴于使用河外源作为基准建立参考架的众多优点，1991 年第 21 届 IAU (International Astronomical Union) 大会正式提出，建议使用以河外源位置为基准的准惯性参考架。

在目前观测精度下，河外天体由于过于遥远，其位置可以视为不变，因此我们可以在这样的运动学假设下建立起国际天球参考系 (the International Celestial Reference System, ICRS)。ICRS 原点位于太阳系质心，参考系坐标轴指向相对遥远河外天体固定不变。为了方便前代天球参考系下观测数据的使用，ICRS 与 FK5 的指向需要保持一定的一致性。所以 ICRS 的标准平面尽可能贴近 J2000.0 平赤道面 (mean equator) ，赤经零点接近 J2000.0 的动力学春分点 (dynamical equinox)[4]。ICRS 的主要实现即 ICRF。

接下来，本文将首先在第 2 章对 VLBI 技术和国际天球参考架的发展历程进行介绍；在第 3 章会对 ICRF3 进行介绍，包含观测技术、定义源选取以及最终得到的星表误差水平等内容；第 4 章中将说明使用 ICRF3 数据时需要注意的一些问题，包括对银河系光行差 (Galactocentric acceleration) 的介绍，对 ICRF3 内部三个波段的参考架以及 ICRF3 与 Gaia 参考架的比较；最后在第 5 章里总结 ICRF3 中存在的不足之处并讨论国际天球参考架未来可能的发展方向。

2 ICRF的发展历程

2.1 VLBI 技术

历代国际天球参考架都来自对甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术得到的观测数据的解算，在介绍 ICRF 前，有必要对 VLBI 技术进行简要的介绍。这部分包含 VLBI 观测原理的简述(见 2.1.1 节)，对 VLBI 观测数据处理思路的介绍 (见 2.1.2 节)，以及对 VLBI 数据解算得到的河外源位置的形式误差特点的介绍 (见 2.1.3 节) 。

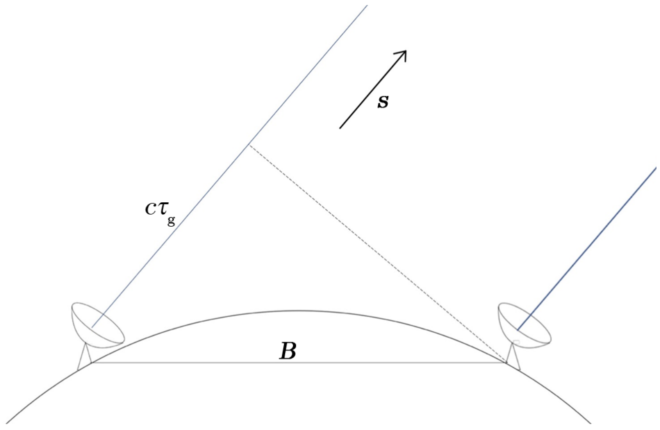
2.1.1 观测原理

VLBI 技术是利用多台射电望远镜同时对同一天体进行观测，再将观测资料进行综合的技术。

最基础的 VLBI 观测建立在两台望远镜组成的基线之上，如图 1 所示。其原理可以用以下表达式描述：

$$\tau_{\mathrm{g}} = \frac{\boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{B}}{c} \quad , \tag{1}$$

其中，τ_{g} 为几何时延 (geometric delay)，在观测中对应天体辐射波前到达两台望远镜的时刻差，是 VLBI 的观测量；$\boldsymbol{B}$ 为两台望远镜之间的基线矢量；$\boldsymbol{s}$ 为天球参考系下天体位置的单位矢量。可见 VLBI 观测不仅可以用于天体测量研究，在大地测量研究中也发挥着重要作用，并且还能解算出将两者关连起来的地球自转和空间姿态相关的量，即地球定向参数 (Earth orientation parameter, EOP)。另一方面，VLBI 观测中包含的丰富的量以及它们之间复杂的相关性也导致影响 VLBI 观测结果的因素很多，分析 VLBI 数据的难度也很大。

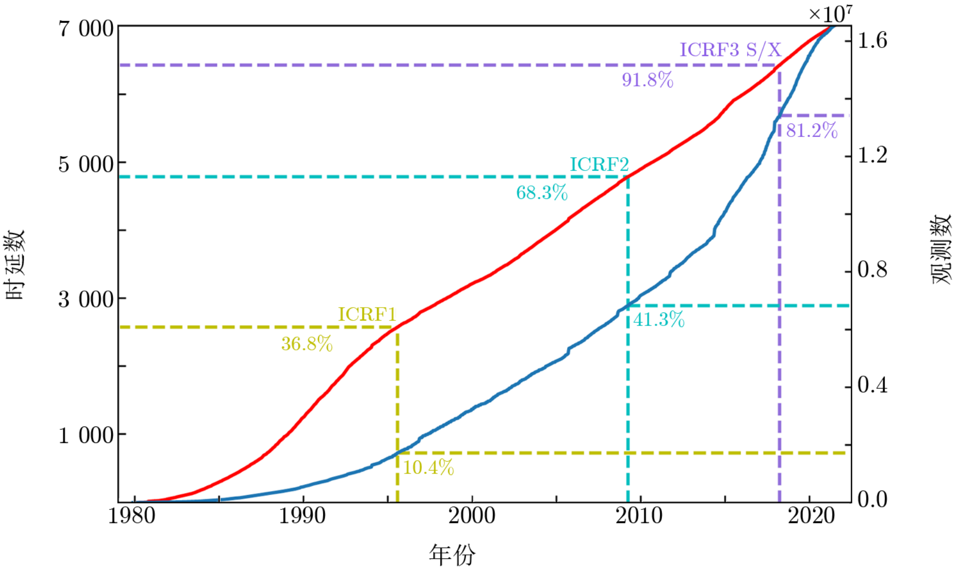


注：来自观测目标源的同一波前到达两个位于不同位置的台站的时间不同。测量得到这一时间差 (几何时延 τ_{g})结合台站间矢量 (基线 $\boldsymbol{B}$) 可以得到目标源方位矢量 $\boldsymbol{s}$。

图 1 VLBI 观测原理示意图

目前，VLBI 望远镜分布在多个国家，在全球组成观测网络，组织和协调工作主要由国际 VLBI 服务组织 (the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS) 负责，此外还有 VLBA (Very Long Baseline Array), DSN (Deep Space Network) 等观测网。根据观测目的不同，VLBI 观测又分为不同类型，具体见文献 [5]。

随着 VLBI 的发展、台站数目的增加、观测数目以及观测得到的时延数目的快速增长，用于 ICRF 研究的资料也日渐丰富。在图 2 中，我们根据 IVS 官网公布的 VLBI 在 S/X 波段的观测资料进行统计，绘制了 VLBI 在 S/X 波段观测次数和观测得到时延数随时间增长情况的示意图，并根据历代 ICRF 释放时的介绍论文中给出的信息，标注了 S/X 波段历代 ICRF 编译时使用的观测数和时延数所占的百分比，以供参考。



注：本图由 IVS 官网公布的观测资料统计得到。黄色、青色和紫色的虚线分别标注了解算历代 S/X 波段的 ICRF 时使用的观测数和时延数占总数 (截止到 2021 年 6 月 23 日) 的百分比。

图 2　VLBI 在 S/X 波段观测次数 (红线) 和观测得到的时延数 (蓝线) 随时间的增长情况

2.1.2　观测数据处理

VLBI 观测得到的数据会首先在相关器 (correlator) 中进行相关处理，再被送往各个数据处理中心 (data centers) 进行解算。目前存在多个软件具有解算 VLBI 观测数据的能力[6−11]，它们采用的先验模型类似，但使用的参数估计方法有所不同。不同软件解算结果具有很高的一致性[3]。

解算 VLBI 数据的主要思路可以这样描述：利用一系列先验模型计算得到理论时延，并将它与观测时延相比较。通过修正模型中参数值的方法使理论值接近观测值。这些参数值便是解算的产物。根据各个参数指代的物理量特点，变量被分为全局变量和局部变量两类，在解算过程中会对它们进行不同的处理：

1) 全局变量，即在观测所涵盖的时间跨度中保持不变的参数。在解算过程中只估计一个值，如台站坐标和速度、源位置等。

2) 局部变量，随时间变化的参数。根据其变化频率不同，分不同时间段进行估计，得到一组值，如地球定向参数 EOP，它在每次观测中都要估计一次；此外还有一些变化较快的参数，在一次观测中就要估计多次，如对流层湿延迟、钟模型和大气梯度变化，它们每次估计的时间间隔分别为 10 min, 30 min 和 6 h。

除了上面列举出的影响因素，从大地测量到天体测量，有许多效应都会对 VLBI 观测结果产生影响，详细见文献 [12]。

解算过程中，地球参考架的指向是由一批核心天线 (core antennas) 的位置和速度决定的，它们的位置变化具有连续性。对这些台站的位置和速度施加宽松的平移和旋转约束，

使解算出的地球参考架原点和指向与最新的国际地球参考架 (the International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 相一致。决定天球参考架指向的方法类似：对一部分位置稳定、结构致密、在天球上分布均匀的源的位置施加无旋转约束，使参考架指向与 ICRS 指向一致。这些用来决定参考架指向的源被称为定义源 (defining sources)，关于它们的具体选择方法参考 3.3 节。

2.1.3 星表误差

由 VLBI 数据解算可以得到河外源位置的形式误差 (formal uncertainties)，它与观测网的灵敏度、源的流量密度和观测次数有关。由于解算 VLBI 数据时采用了最小二乘法，导致形式误差与观测次数的平方根成反比；当观测次数增加到一定程度后，形式误差会变得非常小。并且 VLBI 解算时，假设观测误差呈高斯分布，对非高斯分布误差 (如台站相关的噪声[13]、对流层模型的误差[14]等) 的建模并不完美[15]。这导致 VLBI 观测的真实误差与解算得到的形式误差间存在不一致。此外，随着观测网增加，基线数目也增加，其中完全独立的基线比例降低[5]，假设每条基线上都能对某源进行观测，那么随着观测网变大，一次观测内对此源的独立观测的比例也会降低。非独立的基线之间由于钟模型、对流层模型等与观测台站相关的模型的使用，会带来观测之间的相关性。如果考虑到增加的相关性，真实误差应该比解出的形式误差更大[16]。上面描述的问题都使得形式误差无法反映真实的误差情况，需要对它进行放大处理。

形式误差的放大处理，从 VLBI 观测初期就已经是一个研究的课题。Ryan 等人[17]在 1993 年将形式误差放大 1.5 倍，使其更接近真实误差。第一代国际天球参考架 (为了与泛指的国际天球参考架概念区分开，这里用 ICRF1 表示) 和第二代国际天球参考架 (the 2nd realization of the International Celestial Reference Frame, ICRF2) 中也采用了同样的倍率[3, 18]。将形式误差放大处理后，还需要加上一个本底噪声来防止观测次数增加导致误差下降到过低的水平。ICRF 中采用的本底噪声值是综合考虑下得到的能够较好代表星表整体本底噪声水平的数值，解算放大倍率和本底噪声的具体方法可以参考历代 ICRF 的说明文章[3, 5, 18] 以及其他相关工作[15]。

放大后的星表位置误差由以下关系得到[5]：

$$(\sigma_\alpha \cos\delta)^2 = (s_\alpha \sigma_{\alpha,\mathrm{f}} \cos\delta)^2 + \sigma^2_{\alpha\cos\delta,0} \quad , \tag{2}$$

$$\sigma^2_\delta = (s_\delta \sigma_{\delta,\mathrm{f}})^2 + \sigma^2_{\delta,0} \quad , \tag{3}$$

其中，δ 为源的赤纬坐标，$\sigma_{\alpha,\mathrm{f}}$ 和 $\sigma_{\delta,\mathrm{f}}$ 分别表示赤经和赤纬方向的形式误差，σ_α 和 σ_δ 代表了放大后的误差，即真实误差，s_α 和 s_δ 分别代表两个方向上的放大系数，$\sigma_{\alpha\cos\delta,0}$ 和 $\sigma_{\delta,0}$ 分别表示赤经和赤纬方向的本底噪声。ICRF 星表中给出的误差即是经过上述放大过程后得到的误差。

为了描述星表中河外源位置精度的整体情况，避免受到选择坐标的影响，引入误差椭圆半长轴 $\sigma_{\mathrm{pos,max}}$ 的概念:

$$\sigma^2_{\mathrm{pos,max}} = \frac{1}{2}[\sigma^2_{\alpha*} + \sigma^2_\delta + \sqrt{(\sigma^2_{\alpha*} - \sigma^2_\delta)^2 + (2\sigma_{\alpha*}\sigma_\delta\rho_{\alpha,\delta})^2}] \quad , \tag{4}$$

其中，$\sigma_{\alpha*} = \sigma_\alpha \cos\delta$ 为与赤经方向位置误差，σ_δ 为赤纬方向位置误差，$\rho_{\alpha,\delta}$ 为赤经与赤纬间的相关系数。

2.2 第一代国际天球参考架及其两次扩展

ICRF1 为 ICRS 在射电波段首个毫角秒量级的实现，它于 1997 年在 IAU 第 23 届大会上提出，并从 1998 年 1 月 1 日起，代替 FK5 成为基本天球参考架[3, 4, 19]。ICRF1 使用了 VLBI 在 S/X 波段从 1979 年 8 月到 1995 年 7 月间的观测数据，由 608 个河外源的天体测量信息组成，包含定义源 212 个[3]。ICRF1 中所有源和定义源在天球上的分布见图 3 a) 和图 4 a)，图中源的颜色代表其位置误差椭圆半长轴的大小，图 3 a) 中，位置误差超过 10 mas 的 29 个源也显示为 10 mas。由于河外源自身结构的变化，观测得到的河外源位置也会产生一定的变化，进而对参考架指向产生影响，我们用轴指向稳定度来描述参考架轴指向的稳定程度。ICRF1 的轴指向稳定度达到 20 μas，源位置精度的本底噪声为 250 μas[3]。

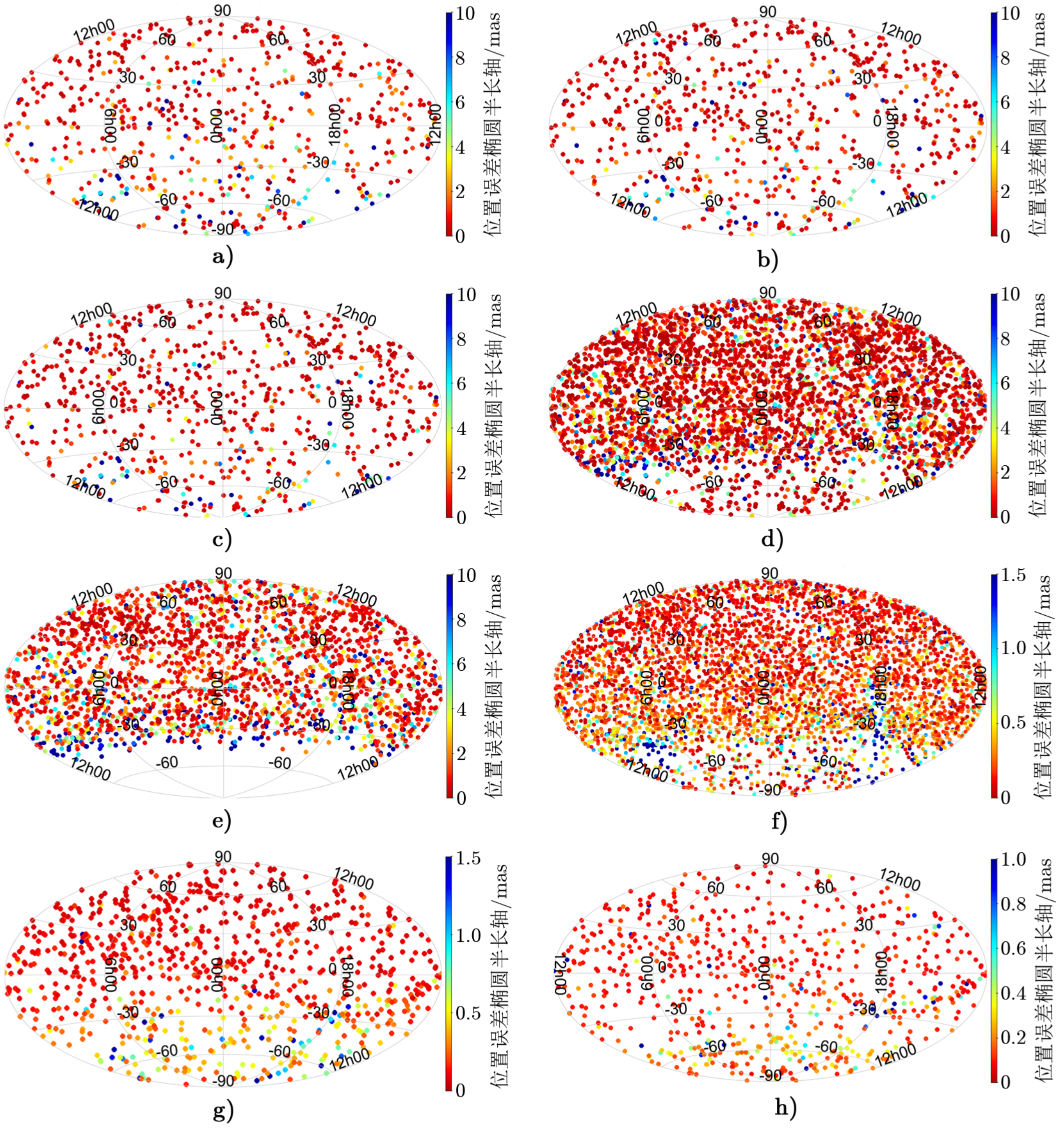
ICRF1 中存在很多需要改善的地方。其中比较显著的问题有：(1) 源数目较少，且由于观测网的分布偏向北半球，ICRF1 的源，尤其定义源，也集中在北天球，给使用带来很多不便；(2) ICRF1 中绝大多数源的结构信息还不清楚，无法判断它们是否为结构稳定的源[3]。

ICRF1 提出后，参考架的研究工作也在持续开展。VLBI 的观测在 1999 年成立的 IVS[20]的组织下变得规律化，观测数据不断积累。ICRF-Ext.1 (First Maintenance and Extension of the ICRF) 和 ICRF-Ext.2 (Second Maintenance and Extension of the ICRF) 分别于 2000 年和 2002 年发表。它们作为 ICRF1 的两次扩展，分别向参考架中添加了 59 颗和 50 颗源，它们均为非定义源，增加了 ICRF1 源在天球中分布的密度，改善了源位置分布的均匀性[21, 22]。

ICRF-Ext.1 中定义源沿用 ICRF1 中的选择，全部源在天球中的分布情况见图 3 b) 所示。其中位置误差超过 10 mas 的 31 个源也按 10 mas 显示。ICRF-Ext.2 从 ICRF1 的定义源里去除了 5 个位置不稳定的源[22]，其中所有源和定义源在天球中的分布见图 3 c) 和图 4 b)，图 3 c) 中位置误差超过 10 mas 的 32 个源也按照 10 mas 显示。

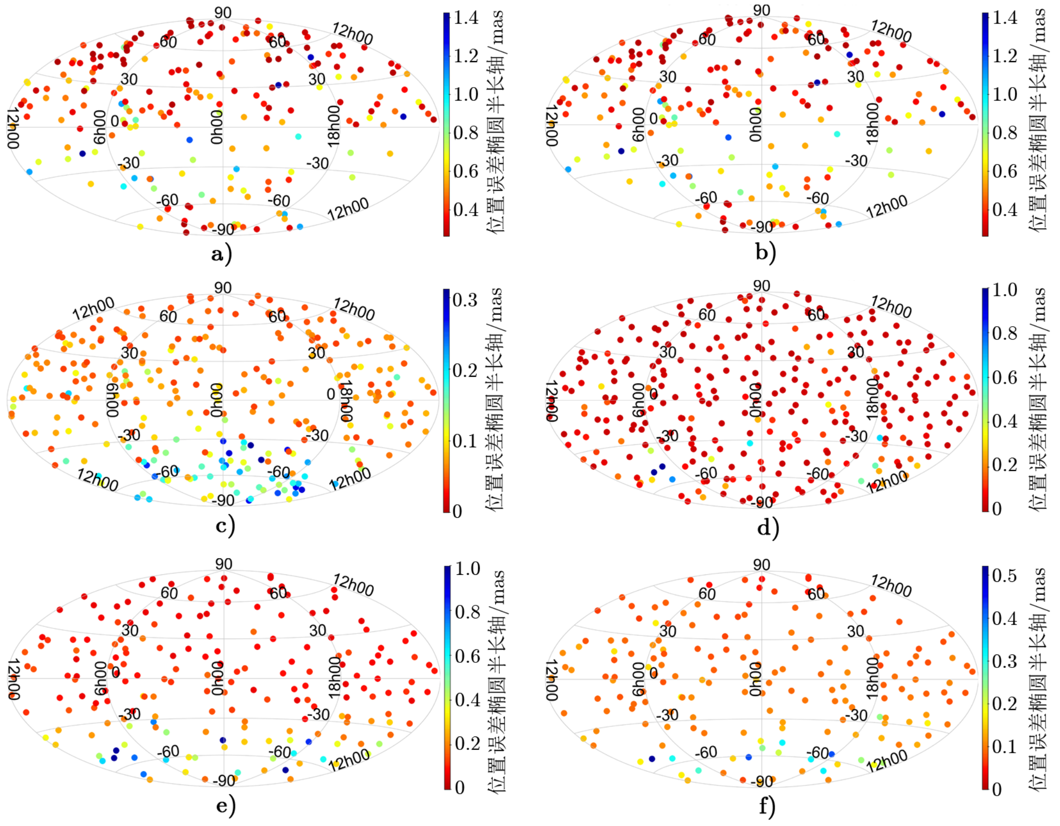
除了主要实现 ICRF1，ICRS 在光学波段由依巴谷 (Hipparcos) 星表实现，即依巴谷天球参考架 (Hipparcos Celestial Reference Frame, HCRF)[2]；太阳系大行星和月历表也可以作为 ICRS 的动力学实现[23–25]，其中包含太阳系大行星以及月球在 ICRS 中的位置和速度信息，应用于太阳系内天体运动的相关研究中[26]。当研究不在射电波段进行，或涉及到多波段参考架的使用时，就需要知道这些参考架与 ICRF1 之间的关系，将它们统一到国际天球参考架上，即进行参考架的连接。

参考架连接分为直接连接和间接连接。直接连接即直接比较两参考架之间某历元共同天体的位置和运动信息，通过在天球上均匀分布的共同天体来得到两参考架的关系；直接连接也可以延伸到天体位置的重合，如通过月掩星、月掩射电源建立月历表与恒星、射电源参考架之间的联系。间接连接的思路之一是利用通过不同观测方法得到的 EOP 序列之间的比较，或通过两天球参考架对应的测地参考架之间的关系得到天球参考架的连接[27]；另外，



注：a) ICRF1 中的源；b) ICRF-Ext.1 中的源；c) ICRF-Ext.2 中的源；d) ICRF2 中的源；e) ICRF2 中 VCS 源；f) ICRF3 S/X 中的源；g) ICRF3 K 中的源；h) ICRF3 X/Ka 中的源。颜色代表以 mas 为单位的位置误差椭圆半长轴大小。超过每幅图对应的位置精度上限的源，其位置精度显示为上限值；这样的源在 a)—h) 中分别有 29, 31, 32, 205, 186, 217, 10 和 17 个。

图 3　源在赤道坐标系下于天球上的位置和位置精度分布图



注：a) , b), c) 分别为 ICRF1, ICRF-Ext.2, ICRF2 参考架中定义源在天球上的位置和位置精度分布图；d), e), f) 分别为 ICRF3 S/X, K, X/Ka 波段参考架中定义源在天球上的位置和位置精度分布图。图中坐标系为赤道坐标系，颜色代表其位置误差椭圆半长轴大小，单位为 mas。S/X 波段和 K 波段中分别有 2 个和 4 个源位置误差椭圆半长轴大于 1 mas，在图中显示为 1 mas。

图 4　各参考架中定义源在天球上的位置和位置精度分布图

间接连接还可以通过一个中间星表分别与两个天球参考架连接，进而得到两天球参考架的关系。

ICRF1 与 HCRF 的连接便是间接连接的一个例子。HCRF 由依巴谷卫星观测得到的数据组成。依巴谷卫星是欧洲空间局 (European Space Agency) 第一代天体测量卫星，发射于 1989 年 8 月，观测得到 118 218 颗恒星的位置、视差、自行等天体测量信息，还包含对恒星的测光观测数据，对变星、双星和聚星等特性的记录等，在实际研究中应用非常广泛[28]。由于依巴谷卫星观测星等上限 $M_{\rm V} = 12.3\,{\rm mag}$，ICRF1 中只有一个光学波段的亮源 3C273 能够被观测到，只有采用间接方法才能完成两者之间的连接，主要方法如下[29]：

(1) 利用 VLBI，多元射电联合干涉网 (the Multi-Element Radio Linked Interferometer Network, MERLIN)，甚大天线阵 (Very Large Array, VLA) 观测得到的射电星位置；

(2) 利用哈勃望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 和 FGSs (the Fine Guidance Sen-

sors) 观测得到的 ICRF1 中源的光学对应体相对于依巴谷星表中源的位置；

(3) 利用照相测量得到河外源光学对应体的位置，以及恒星相对于河外源的精确自行；

(4) 利用 NPM (North Proper Motion) 和 SPM (South Proper Motion) 这样的绝对自行星表；

(5) 利用从两星表中分别解出的 EOP 序列的比较。

关于这些方法更详细的说明以及连接结果，请见文献 [2]。最终采用的连接结果为 Kovalevsky[30]在 1997 年和 Lindegren 与 Kovalevsky[31]在 1995 年所得结果的平均值。两个工作相互独立，都利用了第五种方法。用一组刚性形变矢量 $\boldsymbol{\epsilon}$ 描述两参考架间指向的差别，其变化量 $\boldsymbol{\omega}$ 表示两参考架之间的旋转。采用的结果中，$\boldsymbol{\epsilon}$ 和 $\boldsymbol{\omega}$ 中各项都很小，可视为 0，其误差分别约为 0.6 mas 和 0.25 mas/a。

2.3 第二代国际天球参考架

随着观测设备能力的提升，IVS 组织下 VLBI 数据的积累，以及一些专门的观测项目的实施[32–37]，尤其是 1994 年到 2007 年间的一系列 VCS (VLBA Calibrator Survey) 观测的进行[38–43]，VLBI 观测到的源数目大幅增加观测精度也大幅提升。利用经过改进的先验模型，使用从 1979 年 8 月到 2009 年 3 月 S/X 波段的 VLBI 观测数据，解算得到第二代国际天球参考架。ICRF2 于2009 年的第 27 届 IAU 大会上被采纳，并从 2010 年 1 月 1 日起代替 ICRF1 成为新一代的国际天球参考架[18]。ICRF2 包含 3 414 颗源，其中定义源 295 颗。其指向与 ICRF1 一致，参考架轴稳定性达到10 μas，源位置本底噪声在赤经、赤纬方向均为 40 μas[18]。所有源和定义源在天球中的分布见图 3 e) 和图 4 c) 。图 3 e) 中位置误差椭圆半长轴超过 10 mas 的 205 个源也显示为 10 mas。相比前代参考架，ICRF2 中源数目明显增加，定义源在天球上也分布得较为均匀，并且定义源误差也都在很低范围内。

ICRF2 源数目上的提升主要归功于 VLBA 观测网的利用，ICRF2 中有 2 197 颗源仅被 VLBA 观测过，称为 VCS 源[18]，它们在天球中的分布见图 3 d)，其中位置误差大于 10 mas 的 186 个源也按 10 mas 显示。由于 VLBA 观测台站集中在北半球，观测范围受限，纬度小于 −40° 的 VCS 源只有 15 个，位置精度也相对较差。−40° 以北，VCS 源的分布则比较均匀。ICRF2 中还有 39 颗特殊处理源 (special handling sources)，它们由于结构变化较大，观测位置不稳定，为了防止它们影响参考架的指向，在解算过程中将它们的位置作为局部变量求解[18]。

ICRF2 中依然存在一些不足之处，主要表现在四个方面：

(1) VCS 源数目众多，但由于观测不足 (1 824 个源只经过了一次观测)，位置精度相对较差；此外，39 颗特殊处理源的位置精度也比拥有同样观测次数的其他源要差，这些都导致 ICRF2 中源的位置精度在天球上的分布不均匀。

(2) ICRF2 中的定义源在天球上分布较为均匀，但由于 VLBI 和 VLBA 观测网中位于南半球的台站数目较少，ICRF2 中的源在南天球分布仍比较稀疏。

(3) 通过理论分析[44]和观测数据的分析[45–47]得到，ICRF2 可能存在约 20 μas 的系统误差，以及微角秒量级的旋转。

(4) ICRF2 只给出了 S/X 波段上的参考架。为了满足更多科学和实际需求，需要对更高频率的参考架进行研究。

3 第三代国际天球参考架

ICRF2 发布后，国际天球参考架的加强和维持工作仍在不断进行。到 2012 年，为了充分利用 VLBI 的观测数据，得到现有的最佳精度的参考架，并且考虑到之后与 Gaia 参考架 (由欧洲空间局发射的天体测量卫星 Gaia 在光学波段观测的类星体位置信息构成[48, 49]) 的链接，第 28 届 IAU 大会后不久，IAU 展开了对新一代国际天球参考架的研究。2018 年，第三代国际天球参考架 (the 3rd realization of the International Celestial Reference Frame, ICRF3) 公布①，它于 2019 年 1 月 1 日起，代替 ICRF2 成为最新的国际天球参考架[5]。

ICRF3 将国际天球参考架扩展到 3 个频率下，这 3 个频率的观测数据分别独立地进行解算，都校准至与 ICRF2 指向相一致。ICRF3 轴稳定性在 10 ∼ 20 μas 水平[50]。3 个波段分别为 S/X 波段、K 波段 (24 GHz) 和 X/Ka 波段 (8.4/32 GHz)，其中包含的源数目分别为 4 536, 824, 678 个，定义源分别有 303, 193, 176 个。3 个波段的共同源 600 个，共同定义源 171 个。它们在天球中的分布情况如图 3 f), g), h) 和图 4 d), e), f) 所示。S/X 波段参考架中源密度、精度和在天球上分布的均匀性都较 ICRF2 中的明显增加，K 波段和 X/Ka 波段中源在天球上的分布也比较均匀。

这部分将介绍 ICRF2 以来观测的发展情况 (3.1 节)，ICRF3 参考架的解算 (3.2 节)，ICRF3 定义源的分布和选择标准 (3.3 节)，最后介绍 ICRF3 中源的位置精度情况 (3.4 节)。

3.1 观测的发展

ICRF2 发布后，在 S/X 波段主要取得如下进展：

(1) IVS 组织下的常规观测继续进行，积累了更多观测数据[51, 52]。

(2) 自 1997 年起，由 VLBA 每年进行 6 次的 RDV (the Research and Development VLBA) 观测，在观测河外射电源位置的同时，还通过成图技术研究了源结构及其变化。

(3) 利用 VLBA 在 2014−2015 年间对 VCS 源进行了重新观测，将 ICRF2 中的 VCS 源位置精度提高了 5 倍[53]。

(4) S/X 波段的解算中还包含由美国海军天文台 (the US Naval Observatory) 利用 VLBA 进行的 24 次观测。这些观测的目标源包括：2009 年后未观测的源，时延数小于 50 的源，观测次数 $\leqslant 3$ 次的源，以及在光学波段较亮的源[54]。

(5) 南半球 IVS 观测 (Southern-Hemisphere IVS sessions) 加强了对南半球高纬度地区的观测[55, 56]。

(6) 由欧洲 VLBI 观测网 (European VLBI Network) 和澳大利亚超长基线阵列 (the Australian Long Baseline Array) 等进行的临时的天体测量观测 (occasional astrometric

①ICRF3 各个波段参考架的数据可以在链接中的网站里找到：https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/index.php

observations)。

ICRF3 S/X 波段解算时使用了 VLBI 从 1979 年 8 月 3 日到 2018 年 3 月 27 日间的 13 190 274 个时延，6 206 次观测[5]，如图 2 紫色虚线所示。这些数据中有 200 次 VLBA 观测，所占比例并不高，但其包含的时延量达到总数的 26%，是 S/X 波段数据中非常重要的组成部分。ICRF3 S/X 波段中，有 68% 的源仅被 VLBA 观测过。

除了传统的 S/X 波段，VLBI 还进行了高频观测，分别是 K 波段 (24 GHz) 和 Ka 波段 (32 GHz)。与 S/X 的双频观测类似，X/Ka 波段的观测也使用了双频观测进行电离层的校正。而 K 波段是单频观测，电离层的矫正利用先验模型进行。

K 波段观测主要由 VLBA 进行，在观测位置的同时也进行了成图研究[57, 58]。K 波段数据包含 40 次 VLBA 观测[5, 57, 59]，对赤纬 $-15°$ 以北天区和银盘附近的源进行了观测，另外还有 16 次在位于南非的 Hartebeesthoek 和澳大利亚的 Hobart 的台站间的单基线观测 (其中有一次观测包含位于中国上海的天马 65 m 望远镜，还有一次包含位于澳大利亚的 Tidbinbilla 70 m 望远镜)，补全了南半球高纬度地区的观测。K 波段解算使用的数据包含 2002 年 5 月 15 日至 2018 年 5 月 5 日间的观测，时延数为 482 616 个，其中 99% 为 VLBA 数据。K 波段参考架中有 66% 的源仅被 VLBA 观测过[5]。

X/Ka 波段观测主要在 DSN 观测网中的 3 个台站之间进行，它们分别位于美国加利福尼亚州 Goldstone、西班牙的 Robledo、和澳大利亚的 Tidbinbilla。还有 10 % 的观测有 ESA 位于阿根廷 Malargüe 的望远镜参与，南半球台站数目的增加，优化了 X/Ka 波段观测网结构，提高了南北方向的观测精度[5]。X/Ka 波段参考架由 2005 年 7 月 9 日到 2018 年 1 月 28 日间的 168 次单基线观测解算得到，其中包含时延 69 062 个[5]。

3.2 参考架的解算

ICRF3 S/X 波段和 K 波段参考架在解算时采用 Calc/Solve 软件[6]，X/Ka 波段参考架解算时采用 MODEST 软件[7]。虽然使用不同的软件，但并不会造成 ICRF3 不同波段参考架之间的不一致[5]。ICRF3 中使用的模型可以参考 Charlot 等人的文章[5] ，以及 IERS Conventions 2010[4]。

与前代参考架不同，ICRF3 中不存在特殊处理源，所有源位置都作为全局变量求解，分析显示[5]，这种解算方法不会对参考架产生明显的负面影响。此外，ICRF3 的解算中首次考虑了银河系光行差效应，并为此效应进行了建模，认为其指向银心，大小 5.8 μas/a。这是 ICRF3 与前代参考架的重要不同之处。银河系光行差效应的加入，使得我们对参考架的理解和使用都有很大变化。4.1 节将对银河系光行差效应的原理以及对解算结果的影响进行更加详细的说明。

在 S/X 波段，地球参考架的指向是由 38 个位置稳定的台站确定的；对于 K 波段，核心天线为除了经历过地震的 MK-VLBA 以外的所有 VLBA 台站[5]。利用 Charlot 等人[5]2020年给出的信息，我们绘制图 5 以更加直观地展示 S/X 波段、K 波段核心天线的位置分布。S/X 波段、K 波段参考架的解算过程中，对这些台站的位置和速度施加宽松的平移和旋转约束，使解算出的地球参考架原点和指向与最新的国际地球参考架 ITRF2014[60] 的相一致。

而 X/Ka 波段的情况比较特殊，由于这一波段基本都是单天线观测，EOP 采用先验模型中的值，这些模型本身就与 ITRF2014 相一致，因此不必再施加其他约束。

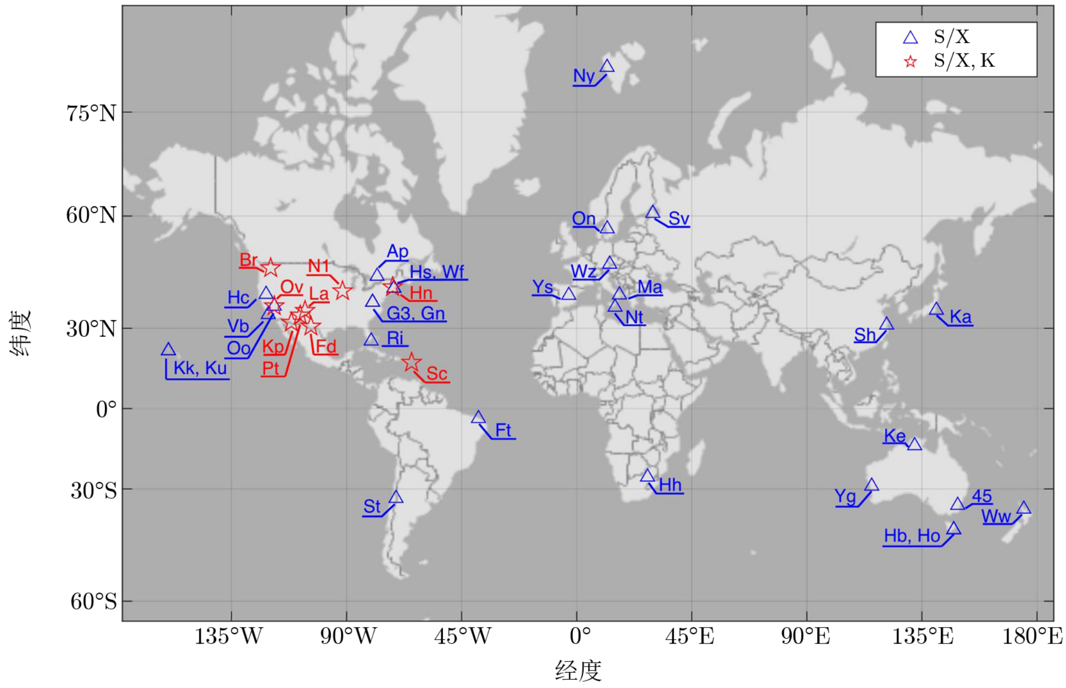


图 5　VLBI 在 S/X 波段和 K 波段的核心天线在地球上的分布情况以及对应的代号[5]

决定天球参考架指向的过程具体分为两步，首先使 S/X 波段参考架与 ICRF2 指向一致，然后再将 K 波段参考架和 X/Ka 波段参考架指向对齐到 S/X 波段参考架指向上。校准 S/X 波段参考架方向时，对 ICRF2 中的 295 个定义源施加了严格的 (10 μas/a) 无旋转约束来实现。最近这些源中有一些经过观测发现结构较为延展，不适合作为定义源使用，但经过验证，去除这些源所得到的参考架轴指向与不去除时得到的参考架轴指向差别不超过 6 μas[5]，小于 ICRF2 的轴稳定性 10 μas，也就是说，加入这些源并不会对 ICRF3 轴指向的校正产生明显的影响。K 波段和 X/Ka 波段参考架指向的校准，基本是利用 S/X 波段定义源与这两个波段参考架分别的共同源来实现。在 K 波段，有 6 个 S/X 波段的定义源由于在K波段观测次数不足 (少于 10 次观测) 而被排除；在 X/Ka 波段，有两个 S/X 波段的定义源：0346+800 和 0743-006，作为野值被排除在外，余下的源用来确定这两个波段参考架的指向，也就是这两个波段各自的定义源[5]。

VLBI 数据解算得到的源位置形式误差需要经过放大来得到位置信息的真实误差，与 ICRF1、ICRF2 一样，ICRF3 在 S/X 波段也沿用了 1.5 倍的放大倍率，在 K 波段也采用了同样的放大倍率。而在 X/Ka 波段，由于观测基本都是单基线观测，几乎不会被 2.1.2 节所描述的现象干扰，形式误差可以较好地代表真实误差水平，所以没有进行放大的必要[5]。

为防止观测次数增加后，位置误差下降到过低的水平，还需要在放大的基础上加上本

底噪声。S/X 波段和 K 波段采用的本底噪声计算方法，可以参考 Charlot 等人[5]2020 年的工作，而 X/Ka 波段由于观测次数较少，无法得到可靠的结果，所以参考了 S/X 波段的结果[5]。由计算得到，S/X 波段赤经方向和赤纬方向的本底噪声均为 30 μas，K 波段赤经和赤纬方向的本底噪声分别为 33 μas 和 57 μas，X/Ka 波段本底噪声参考 S/X 波段计算结果，赤经赤纬方向均为 30 μas[5]。

3.3 定义源

由于 VLBI，尤其是 S/X 波段对天球上源的观测次数差别较大，源自身的结构的致密程度和稳定程度也不同，需要选择一组位置稳定、结构致密的源作为定义源，它们一般在天球上均匀分布，用来决定 ICRF 的指向。

ICRF1 中，选择定义源的标准总结为 3 条：1) 拥有超过 20 个时延、观测时间跨度超过 2 年并且赤经赤纬坐标的形式误差小于 1 mas；2) 在与其他星表的比较中，位置差小于 0.5 mas 且在 3σ 范围内；3) 位置足够稳定，位置坐标在 VLBI 数据解算时可以作为全局变量处理，没有明显源结构 (结构时延 $\tau_{\rm median}$ 中位数小于 10 ps)，在研究赤经赤纬坐标变化的辅助解中，坐标变化的明显程度低于 3σ。得到的定义源为 212 个，分布见图 4 a)。ICRF1 在选择定义源时，没有考虑其在天球上的分布情况，图中也可以看到，大部分定义源都分布在北半球。此外，成图信息的缺失使得能够判断结构好坏的源仅有 42 个，也给定义源的选择带来了困难[3]。

ICRF2 中定义源的选择标准以位置稳定性为基础，并考虑了源结构的致密程度和在天球上的分布。首先，ICRF2 中观测次数 > 10，观测时间跨度超过 2 a，位置信息作为全局变量处理的源按照赤纬分为 5 组。定义代表源位置稳定性的量 r[18]：

$$r = \sqrt{wrms^2_{\alpha\cos\delta}\chi^2_{\upsilon,\alpha\cos\delta} + wrms^2_{\delta}\chi^2_{\upsilon,\delta}} \quad , \tag{5}$$

其中，$wrms_{\alpha\cos\delta}$ 和 $wrms_{\delta}$ 分别是赤经和赤纬方向上观测位置相对于平均位置的残差的加权均方根值，$\chi^2_{\upsilon,\alpha\cos\delta}$ 和 $\chi^2_{\upsilon,\delta}$ 分别为赤经和赤纬方向上观测位置相对平均位置拟合得到的约化卡方值 ($\chi^2_{\rm reduced}$)。r 由 VLBI 观测中解算出的源位置-时间序列计算得到。每组源先按 r 值排序，再按位置误差椭圆半长轴大小排序，将两个顺序综合成 $1 \sim 100$ 的数字，得到综合考虑了源位置精度和稳定性的量 P[61]。根据 Fey 等人[62]的分析显示，得到稳定轴指向必需的定义源数目为 200 个，理想情况为 380 个。以此为参照，选择 $P \geqslant 40$ 的 423 个源作为定义源的候选[18]。定义连续的结构指数 (structure index) $SI_{\rm c}$ 为[18]：

$$SI_{\rm c} = 1 + 2\lg(\tau_{\rm median}) \quad , \tag{6}$$

其中，$\tau_{\rm median}$ 为结构时延中位数，单位皮秒 (ps)，当 $\lg(\tau_{\rm median}) < -0.5$ 时，取 $SI_{\rm c} = 0$。以 $SI_{\rm c}$ 作为衡量源结构致密程度的标准，从定义源候选中筛选得到 295 个定义源。

ICRF2 的定义源在天球上的分布情况如图 4 c) 所示。它们在天球上位置分布较为均匀，但在一些区域也存在空缺，南半球高纬度地区的定义源位置精度稍差一些。此外，ICRF2 在选择定义源时虽然考虑了源结构问题，但由于南半球的源缺少成图信息，ICRF2 定义源中有 25% 的源 (多位于南半球) 没有结构信息[18]。

ICRF2 发布后，随着观测量的累积以及河外射电源成图工作的推进，对河外射电源位置的稳定性、结构的致密性等都有了新的了解，因此 ICRF3 重新挑选一批全新的定义源，而不是沿用 ICRF2 中的定义源或在它们的基础上进行改善。ICRF3 S/X 波段选择定义源的标准可以总结为以下三条：(1) 定义源整体在天球上分布的均匀程度；(2) 足够的观测次数和单个源的位置稳定性；(3) 源的结构致密性。选择定义源的思路大致如下：将天球分为大小均匀的扇区，并在每个扇区中分别利用 (2) 和 (3) 的标准选取位置最稳定、结构最致密的源作为定义源，进而得到定义源[5]。

ICRF3 S/X 波段选择定义源时将赤经均分为 18 份，再将连接南北天极的 z 轴均分为 18 份，总共得到 324 个扇区[5]。由于越靠近极区，随着 z 轴绝对值增大，赤纬增加的速度也变大，所以这种分割方法会导致靠近极区时单个扇区内包含的赤纬跨度增加，也可以保证高纬度地区扇区的面积与赤道附近的基本一致，令得到的定义源在天球上分布更为均匀。描述源位置稳定性时，ICRF3 S/X 波段沿用了 ICRF2 中的量 r (这里写为 s)[5]。进行源结构致密程度的判断时，采用的是利用河外射电源成图资料进行目视检查的方法[5]。多历元的成图资料来自 BVID (the Bordeaux VLBI Image Database)[63]和 Radio Reference Frame Image Database[64]两个数据库。

ICRF3 S/X 波段通过筛选得到 303 个定义源，它们的分布如图 4 d) 所示。定义源在天球上的位置和精度分布都很均匀。324 个扇区中，2 个扇区内缺少观测次数足够多的源，19 个扇区中缺少结构致密的源，其余扇区中都有定义源。定义源中没有成图信息的源数目减少到 25 个，仅占定义源总数的 8%。ICRF3 的定义源大多被 IVS 组织下的 VLBI 所观测过，只有 21 个是只被 VLBA 观测过的源。尽管选择定义源时以源位置的稳定性为主要标准，但 303 个定义源中，有 246 个在各自的扇区中也是结构最稳定的源，可见位置的稳定性和结构的致密性之间存在着较好的一致关系，而且尽管并未被纳入选择标准中，但上面的选择方法所得到的定义源的位置误差都很小[5]。

如 3.2 节所介绍的那样，K 波段和 X/Ka 波段的定义源是在 S/X 波段的定义源分别与这两个波段的共同源的基础上确定的。它们在天球上的分布见图 4 e) 和图 4 f)。可以看出这两个波段定义源的位置分布也比较均匀，但位置误差 (尤其是 K 波段定义源的) 分布不如 S/X 波段的均匀，南半球明显差于北半球，这可能与两个高频波段观测台站主要集中在北半球有关。

3.4　ICRF3 河外射电源星表精度

解算参考架时，得到射电源位置坐标的同时还会解算出一些辅助参数，这些参数的可靠程度可以作为衡量参考架质量的间接标准。常用的辅助参数是地球定向参数 (EOP)，因为每次常规观测中都能解算出一组 EOP 值，可以在统计层面上检验辅助参数的可靠性。

ICRF3 在 S/X 波段和 K 波段解算过程中都会得到 EOP 序列，而 X/Ka 波段由于使用的观测基本是单基线观测，无法解算出 EOP 序列。将从每个观测组中解算得到的 EOP 值分别与 IVS 联合解 ivs15q2X 相应历元的结果进行比较，可以来检验解算出的 EOP 序列的可靠性，进而验证对应的天球参考架的可靠性[5]。

依据解算结果 (具体请参考 Charlot 等人[5]2020 年的工作) ，S/X 波段解算出的章动改正量与 ivs15q2X 序列的基本吻合，极移与 UT1 的差别稍大一点，可能是地球参考架的指向与旋转的校准不一致导致的，这与校准时使用的台站有关，但对天球参考架没有影响[5]。而在 K 波段，极移项 y_p 的误差和与 ivs 序列的差别都比较大，这可能是由 K 波段台站地理位置分布导致的。K 波段中很多台站都来自 VLBA 观测网，它们集中在北半球，南北跨度不大，导致从 K 波段观测中解算 y_p 项比较困难。UT1 项与 ivs 序列的差别也比 S/X 波段的明显，这可能是由于 K 波段解算时地球参考架的校准使用的 9 个台站都位于北半球，导致尽管没有明显的不一致，但它没有像 S/X 波段那样精确地与 ITRF2014 链接。不过这种差别对天球参考架也没有影响[5]。总的来说，通过 EOP 序列的验证，ICRF3 在 S/X 波段和 K 波段的天球参考架都很可靠。

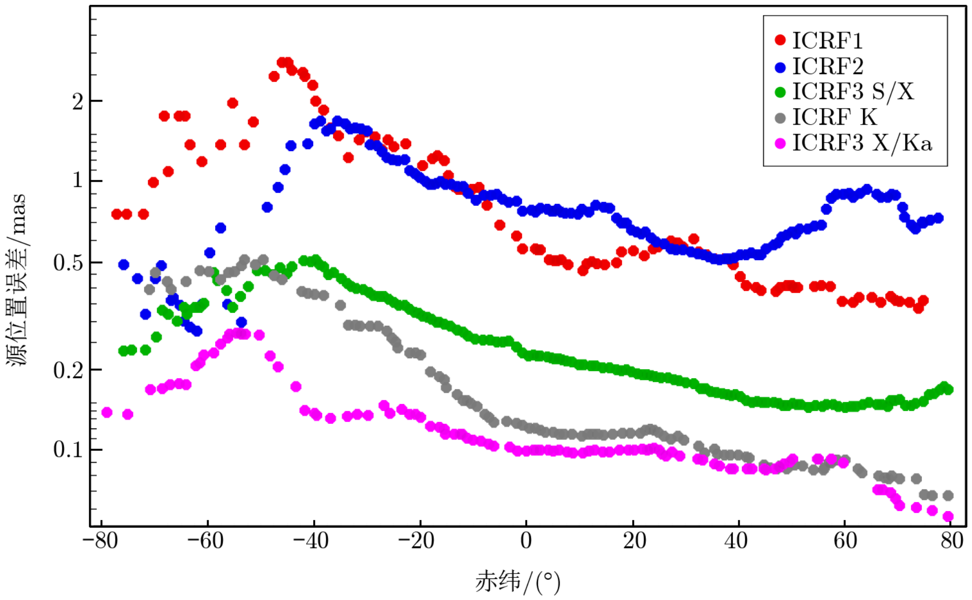
ICRF3 三个波段参考架中，源的位置和位置误差在天球中的分布如图 3 f), g), h) 所示。图中，源用带颜色的圆点表示，颜色由其位置误差椭圆半长轴大小决定，误差椭圆半长轴大小的显示上限在 S/X、K 和 X/Ka 波段分别为 1.5 mas, 1.5 mas 和 1 mas。S/X 波段超过 1.5 mas 的有 217 个源 (占总数 4.8%)，K 波段超过 1.5 mas 源有 10 个(占总数 1.2%)，X/Ka 波段超过 1 mas 的源为 17 个 (占总数 2.5%)。

与前代参考架 ICRF2 相比，ICRF3 S/X 波段参考架中的源在天球上的分布更加均匀，总体数目也有所增加，但仍然存在南半球位置精度比北半球差的问题。ICRF3 K 波段中也存在位置、精度南北分布不均匀的现象。这两个波段参考架由于受到 VLBA 观测范围的限制，赤纬小于 $-40°$ 的源数目较少。ICRF3 X/Ka 波段不像其他两个波段那样依赖 VLBA 观测，反而没有这种明显的不均匀现象，不过台站数目较少也导致了 X/Ka 波段参考架中源的分布较为稀疏。

图 6 给出 ICRF 历代参考架中源位置误差随赤纬的分布情况，为了与前代参考架进行对比，除了 ICRF3 这里还考虑了 ICRF1 和 ICRF2。图中的点是按照赤纬排序后，以 15° 为一组的大小，以1° 为步长得到的位置误差椭圆半长轴的滑动中位数。由于 VCS 源的精度问题，ICRF2 在赤纬大于 $-40°$ 时位置精度甚至比 ICRF1 略低一点。相比前代参考架，ICRF3 位置精度明显提高，位置误差随赤纬的变化幅度也有所减小。在 S/X 波段，当赤纬从 $-40°$ 增加时，位置误差逐渐减小，虽然在高纬度区域有上升趋势，但总体分布比较稳定。在 $-40°$ 到 $-45°$ 之间，位置误差明显增大，随后它又随着赤纬接近 $-90°$ 而减小。K 波段和 X/Ka 波段也有相似的变化趋势，位置误差中位数达到最大值时对应赤纬约为 $-50°$。

VLBI 观测解算得到的源位置误差大小与源被观测的次数有很大关系，而这又与观测台站的分布关系密切。三个波段的观测台站都存在北半球分布比南半球更密集的情况，能被位于北半球的台站观测到的源观测次数多于只能通过南半球台站的，相应地，位置精度也更高。而位于南极、南美洲等地的南半球高纬度地区的台站投入使用要早于南半球中纬度的，所以在赤纬趋向 $-90°$ 时位置误差存在减小趋势。

三个波段参考架中源的位置误差统计情况见表 1 和表 2。表 1 为三个波段所有源和各个波段所有定义源的位置精度统计情况，为了与前代国际天球参考架位置精度进行比较，还加



注：滑动中位数的跨度为 15°，步长是 1°。

图 6　历代国际天球参考架中源位置误差椭圆半长轴的滑动中位数随赤纬的分布

入 ICRF1 与 ICRF2 的情况。表 2 为 ICRF3 三个波段的 600 个共同源以及 171 个共同定义源的位置误差统计情况。

表 1　ICRF1, ICRF2 以及 ICRF3 各个波段参考架中全部源和定义源位置误差、赤经赤纬间的相关系数、位置误差椭圆半长轴大小的中位数

波段	源数目	位置坐标误差 σ_{α^*}/µas	位置坐标误差 σ_δ/µas	相关性系数 coeff.	误差椭圆半长轴 $\sigma_{pos,max}$/µas
	ICRF1 与 ICRF2 中的所有源				
ICRF1	608	493	570	0.16	640
ICRF2	3414	396	739	0.22	765
	ICRF3 中的所有源				
S/X	4536	127	218	0.13	223
K	824	74	136	0.30	139
X/Ka	678	76	104	0.43	115
	ICRF1 与 ICRF2 中的所有定义源				
ICRF1	212	336	385	0.10	484
ICRF2	295	55	67	0.08	69
	ICRF3 中的所有定义源				
S/X	303	36	41	0.07	41
K	193	63	120	0.28	122
X/Ka	176	62	92	0.40	98

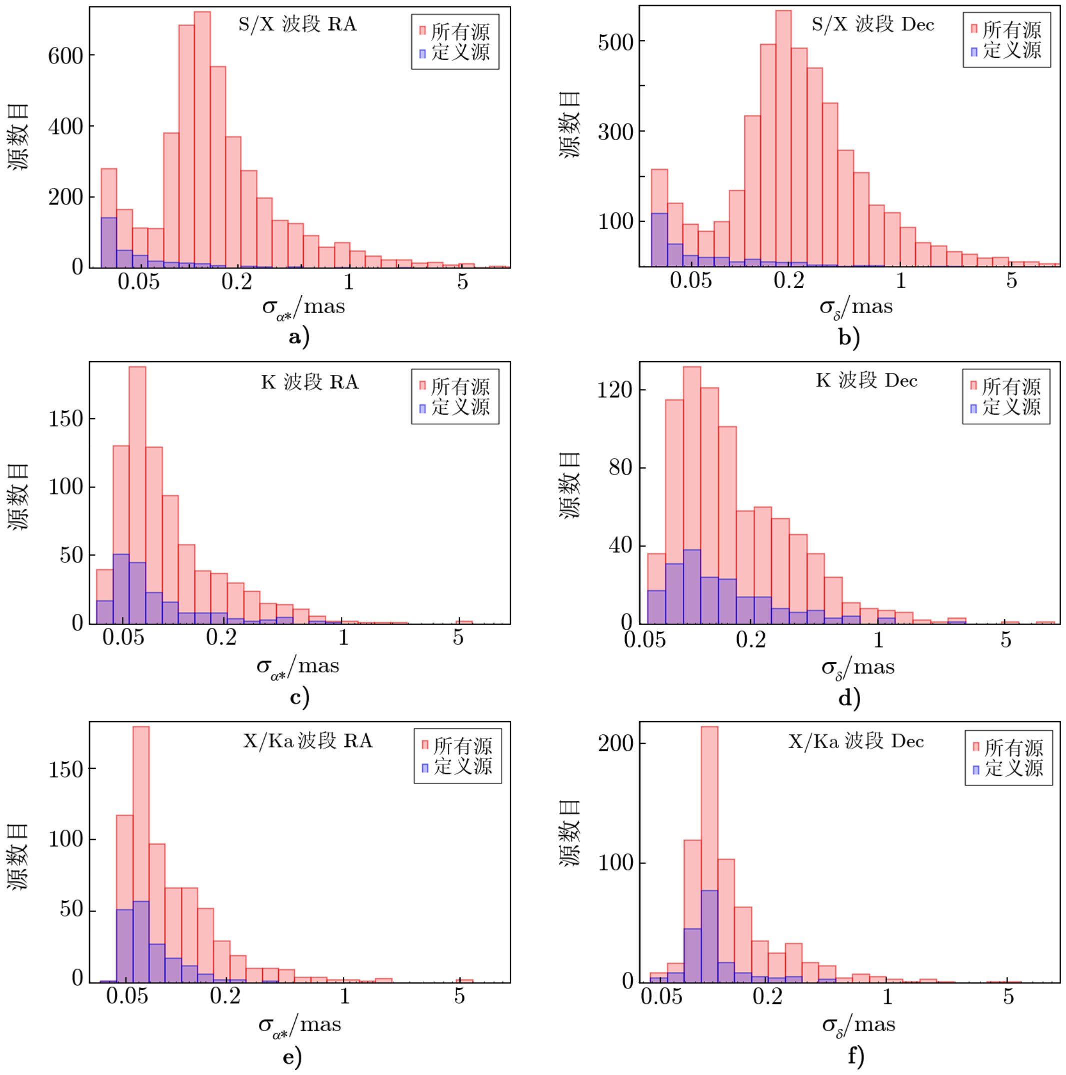
表 2 ICRF3 所有波段参考架中的共同源和共同定义源的位置误差、赤经赤纬间的相关系数、位置误差椭圆半长轴大小的中位数

波段	源数目	位置坐标误差 σ_{α^*}/μas	位置坐标误差 σ_{δ}/μas	相关性系数 coeff.	误差椭圆半长轴 $\sigma_{\text{pos,max}}$/μas
	所有共同源				
S/X		48	64	0.08	64
K	600	68	132	0.31	135
X/Ka		69	100	0.44	108
	所有共同定义源				
S/X		33	35	0.06	35
K	171	60	113	0.27	115
X/Ka		62	92	0.40	97

结合这两个表和 ICRF3 三个波段参考系中所有源和定义源在赤经、赤纬方向误差的频数分布直方图 (见图 7) ，可以清晰地看到各个波段位置误差分布的特点。由表 2 可知，ICRF3 三个波段中源赤纬方向误差都约为赤经方向的 $1.5\sim2$ 倍左右，这是由于 VLBI 观测网普遍具有东西方向基线长于南北方向的特点。比较三个波段参考架中所有源的误差中位数等统计量，可以发现 S/X 波段源的位置误差略大于两个高频波段的。图 7 也显示，S/X 波段最大的峰对应的赤经、赤纬方向误差约 100 μas 和 200 μas，在 K 波段和 X/Ka 波段参考架中源赤经方向的误差在 $50\sim60$ μas、赤纬方向误差在 $80\sim90$ μas 区间内达到峰值。而比较定义源、三个波段参考架共同源时，S/X 波段位置精度好于其他两个波段，对于三个波段的共同定义源，这一现象更加明显。

由 S/X 波段赤经、赤纬方向误差分布的统计直方图 (见图 7 a), b))，可见除了较大的峰值外还存在一个小峰，大致分布在 30 μas 处，接近本底噪声的大小。这是由于 ICRF3 S/X 波段存在同时拥有 IVS 常规观测和 VLBA 观测的源以及主要仅由 VLBA 观测的源，较大的峰属于后一种情况，包含观测源数目也较多。虽然 VLBA 的补充观测极大地提高了其误差水平，但与由 VLBI 常规观测进行监测、拥有长期观测历史和大量观测资料的源相比，主要仅由 VLBA 技术观测的源精度还是稍逊一筹。而 ICRF3 S/X 波段参考架的定义源与两个高频参考架的共同源大多是由 IVS 常规观测数据解算出位置的源，它们在 S/X 波段观测资料最丰富，相应地，位置精度也是三个波段参考架中最好的。

由于 ICRF3 中 K 波段和 X/Ka 波段参考架定义源的选择依据仅为源结构和 S/X 波段的观测情况，可以预见到，这两个波段定义源与非定义源之间观测精度上的差别并不大。由表 1 可知，两个参考架中定义源的位置误差中位数只比其他源的低 $10\%\sim15\%$。这种定义源与非定义源之间差别变小的原因，也可能有以下两种：(1) 高频率下射电源整体结构更加致密，导致定义源和其他源之间界限模糊；(2) 高频观测时选择的观测对象偏向结构更加致密的源，导致观测到的源里没有 S/X 波段中那么多结构弥散的源[5]。其真正的原因还有待进一步的研究。



注：红色表示所有源，蓝色表示定义源。超出坐标范围 (10 mas) 的源数目在 S/X 波段中赤经方向为 15 个，赤纬方向为 22 个；K 波段中赤纬方向为 1 个；X/Ka 波段中两个方向均为 5 个。它们都是非定义源。

图 7　ICRF3 三个波段源赤经、赤纬方向位置误差的频数分布直方图

由图 7 可知，ICRF3 S/X 波段有 359 个 (总数的 8%) 赤经或赤纬方向位置误差大于 1 mas 的源，其中位置误差大于 10 mas 的有 22 个 (总数的 0.5%)；ICRF2 中，对应的源数目分别为 1 428 个 (总数的 42%) 和 204 个 (总数的 6%)；K 波段和 X/Ka 波段位置误差大于 1 mas 的源数目分别为 26 个 (总数的 3%) 和 17 个 (总数的 2.5%)，大于 10 mas 的源数目分别为 1 个和 5 个。

4 ICRF3 的使用

ICRF3 较前代参考架有着整体的提高，包括参考架中源密度、在天球上分布的均匀性、位置精度的提高等。同时，ICRF3 考虑了银河系光行差效应对参考架的影响，还将参考架扩展到 S/X, K, X/Ka 三个波段。这部分将详细讨论考虑银河系光行差效应后，ICRF3 数据的使用方法；并对不同参考架以及位于不同参考架间源位置的比较方法给出说明。用于比较的参考架包括：ICRF3 S/X 波段参考架与其前代参考架 ICRF2，ICRF3 三个波段参考系，ICRF3 与根据 Gaia 观测得到的最新参考架：Gaia-CRF3。通过比较结果，简单讨论了这些参考架之间的一致性。

4.1 银河系光行差

银河系光行差，也称为长期光行差漂移，是由于太阳系质心绕银河系中心做轨道运动的加速度引起的视自行效应。

同一地点的速度不同的两个观测者，观测同一目标时，其观测结果之间会产生偏差，即光行差效应。如太阳系质心相对银心运动速度约 248 km/s[65]，相对于宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) 运动速度约 370 km/s[66]，导致的光行差分别约为 $171''$ 和 $255''$[67]。这些偏差本身很大，但如果速度不发生变化，那么位置差也不会变化。在无法得知相对银心或者相对 CMBR 静止的源位置的情况下，无法观测到这一现象。并且当位置差保持常数时，也不会对参考架带来影响。

但当速度有变化，也就是说存在加速度时，光行差本身也会发生变化。太阳系质心作为国际天球参考系的坐标原点，按照运动学基本假设应该为静止或做匀速直线运动的，但实际上它相对宇宙微波背景也存在加速度。Sovers 等人[12]在 1998 年将太阳系质心相对宇宙微波背景的加速度分为几个部分，分别为：

(1) 太阳系质心相对于本地静止标准的运动，加速度大小约 $2\times10^{-12}c/\mathrm{a}$[67]；

(2) 本地静止标准相对于银心的运动，即太阳系的向心加速度，是最明显的部分，加速度大小约 $2\times10^{-11}c/\mathrm{a}$[67]；

(3) 银心相对于本星系群的运动，加速度大小远小于 $2\times10^{-11}c/\mathrm{a}$，速度大小在几十年的范围内都可以看成常数；

(4) 本星系群相对与宇宙微波背景的运动，也即相对于河外源参考架的运动，同 (3) 中情况，几十年内可将速度大小视为不变。

实际观测中，只能观测到这些加速度引起的总效应，无法区分出具体是由哪部分运动引起的，但由于太阳系质心相对银心运动的加速度比其他部分大很多，接下来对长期光行差漂移大小的估计也转换为对第 (2) 部分引起的长期光行差漂移效应的估计。

由于太阳系质心绕银心旋转的周期很长，在几十年内可以将加速度的方向视为不变，其引起的源位置变化类似于自行，这一自行与源本身的距离无关，在天球上呈一对称的偶极场状，在垂直加速度方向上达到最大，在与加速度矢量平行方向为零。

当参考架中源在天球上分布均匀时，这一效应并不会影响参考架的指向。而在 ICRF3

中，定义源在天球上的分布仍存在一定不均匀性，银河系光行差会引起参考架的扭曲[68]，需要在参考架解算过程中予以去除。除此以外，银河系光行差还会导致地心天球参考架 (Geocentric Celestial Reference System, GCRS) 出现转动，而地球自转轴的指向就是由天球中间极 (Celestial Intermediate Pole, CIP) 在 GCRS 中的位置来描述的[69–71]，描述地球指向的参数，即岁差和章动，也会因此受到影响[68]。Malkin[72]2011 年和 Liu 等人[44]2012 年利用不同的方法分别得到银河系光行差对地球岁差速率的影响，两个工作得到的结果基本一致，大约为 1 μas/a。随着时间的积累，数十年后这一影响将超过地球岁差参数本身的精度，也需要在 VLBI 数据处理过程中进行消除。

定义 $A_{\rm G}$ 为银河系光行差常数[73]，表示为：

$$A_{\rm G}=\frac{a}{c}=\frac{V_0^2}{R_0c}\quad , \tag{7}$$

其中，R_0 表示太阳系质心到银心的距离，V_0 为太阳系质心沿轨道的线性速度。对具体某河外源自行带来的影响则与其在天球上的位置有关，对于一个银经为 l，银纬为 b 的源，由太阳系质心加速度引起的视自行效应在银经银纬方向的大小 $\mu_l\cos b$、μ_b 分别为：

$$\mu_l\cos b=-A_{\rm G}\sin l\quad , \tag{8}$$

$$\mu_b=-A_{\rm G}\sin b\cos l\quad . \tag{9}$$

太阳系绕银心做周期大约为 2.4×10^8 年的轨道运动，将其简化为加速度指向银心的平面圆轨道运动，并根据 IAU 建议的银河系常数[74]，将 $R_0=8.5$ kpc, $V_0=220$ km/s，代入式 (7) 中，则可得到银河系光行差常数 $A_{\rm G}$，为 4 μas/a。解算 ICRF3 时使用的 VLBI 观测数据，时间跨度已经达到 40 多年，这一效应给河外源位置带来的影响也将超过 150 μas[5]。可见在目前的观测精度下，利用 VLBI 观测数据能够拟合出银河系长期光行差效应的大小。

考虑银河系光行差效应意味着河外源位置不再是与历元无关的量，在精度要求较高，历元与参考架中给出的位置历元相距较远时，必须对 ICRF3 中给出的河外源位置进行修正才能使用。利用太阳系质心加速度矢量 $\boldsymbol{a}_\odot$ 定义矢量 $\boldsymbol{A}_{\rm G}=\boldsymbol{a}_\odot/c$，$\boldsymbol{A}_{\bf G}$ 在质心天球参考系 (Barycentric Celestial Reference System, BCRS) 下分解为 (A_1,A_2,A_3)：

$$\boldsymbol{A}_{\bf G}=A_{\rm G}(\cos\delta_{A_{\rm G}}\cos\alpha_{A_{\rm G}},\cos\delta_{A_{\rm G}}\sin\alpha_{A_{\rm G}},\sin\delta_{A_{\rm G}})=(A_1,A_2,A_3)\quad , \tag{10}$$

其中，$A_{\rm G}$ 为矢量 $\boldsymbol{A}_{\bf G}$ 的模，即银河系光行差常数，$\alpha_{A_{\rm G}}$ 和 $\delta_{A_{\rm G}}$ 为赤道坐标下表示的矢量 $\boldsymbol{A}_{\bf G}$ 的方向。对一位置为 (α,δ) 的源，长期光行差引起的视自行效应为：

$$\Delta\mu_\alpha\cos\delta=(-A_1\sin\alpha+A_2\cos\alpha)\quad , \tag{11}$$

$$\Delta\mu_\delta=(-A_1\cos\alpha\sin\delta-A_2\sin\alpha\sin\delta+A_3\cos\delta)\quad . \tag{12}$$

历元 t 对应的源位置相对于参考历元 t_0 应进行的位置改正为：

$$\Delta\alpha(\alpha,\delta)=\Delta\mu_\alpha(t-t_0)\quad , \tag{13}$$

$$\Delta\delta(\alpha,\delta)=\Delta\mu_\delta(t-t_0)\quad . \tag{14}$$

在使用过程中可以利用这一关系，对 ICRF3 给出的河外射电源位置进行修正，使其更贴近使用历元下河外射电源的真实位置。

从 VLBI 应用到天体测量领域初期开始，1983 年 Fanselow[75]就指出银河系光行差效应可能对 VLBI 观测到的河外源位置产生影响。前面的估计结果也显示，随着 VLBI 观测数据在时间上的积累，利用 VLBI 观测数据也能对这一效应进行拟合。常用的估算方法有两种，一种是使用测地 VLBI 观测得到的河外源位置信息进行拟合[76–78]，另一种是利用 VLBI 观测得到的银河系脉泽的位置和自行进行计算[79–82]。前者得到的光行差常数大小在 $5.2 \sim 6.4$ μas/a 之间，后者得到的相对较小，在 $4.8 \sim 5.4$ μas/a 之间，两种方法的误差都在 0.3 μas/a 左右。利用银河系脉泽的观测进行计算时，假设太阳系与本地静止标准 (the Local Standard of Rest, LSR) 一起绕银心转动，因此这种方法得到的光行差常数与利用测地 VLBI 对河外源观测数据计算得到的在大小上的差别可能就是由太阳系相对本地静止标准的运动引起，也可能是由两种方法各自的系统误差引起。此外，使用测地 VLBI 观测数据进行拟合的工作中，没有假设太阳系质心加速度的方向。有些工作得到的方向与银心方向基本重合，而有些工作中，方向与银心夹角可达到 20°，它们的误差都在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 之间[76–78, 83]。2019 年，MacMillan 等人[84]对这些工作进行了总结。

ICRF3 的工作组利用 VLBI 在 S/X 波段近 40 年的观测数据，重新计算了银河系光行差效应的大小和方向，而不是采用已有的某个工作得到的结果[85]，主要原因有两点。

(1) 已有工作中，估算得到的银河系光行差效应的大小不一，方向也不一致。没有明显证据表明其中任何一个应该被采用。

(2) 已有的工作中，使用的数据最新到 2016 年，而 ICRF3 解算中使用的数据则包含到 2018 年。鉴于后两年 VLBI 观测提供了大量高精度的数据，且对银河系光行差效应进行计算时最好采用与 ICRF3 解算时相同的观测数据，后两年的数据也应该被包含在计算中。

由于在对银河系光行差效应进行计算时，需要将河外源位置看成局部变量来计算自行效应，而解算参考架过程中，河外源位置被看成不随时间变化的全局变量，所以对这一效应的计算不能与参考架解算同时进行。ICRF3 中采用的数值是在参考架解算之前得到的，在接下来解算 ICRF3 三个波段参考架时都进行了考虑[5]。

解算时使用了 VLBI 对河外源的观测数据，而不是对银河系脉泽的观测数据，这样计算过程中使用的数据与解算 ICRF3 本身时相同，可以保证结果的自洽性。解算利用了 VLBI 在 S/X 波段 1979 年到 2018 年 5 月观测的所有数据，采用 J2015.0 为位置历元，将光行差常数作为一个全局变量进行拟合。对于一些由于源结构效应导致自行很大的源，即 ICRF2 中的 39 个特殊处理源，将它们的位置作为局部变量求解[5]。

ICRF3 选择的位置历元为 J2015.0，而不是与坐标系历元相同的 J2000.0，其原因为[5]：

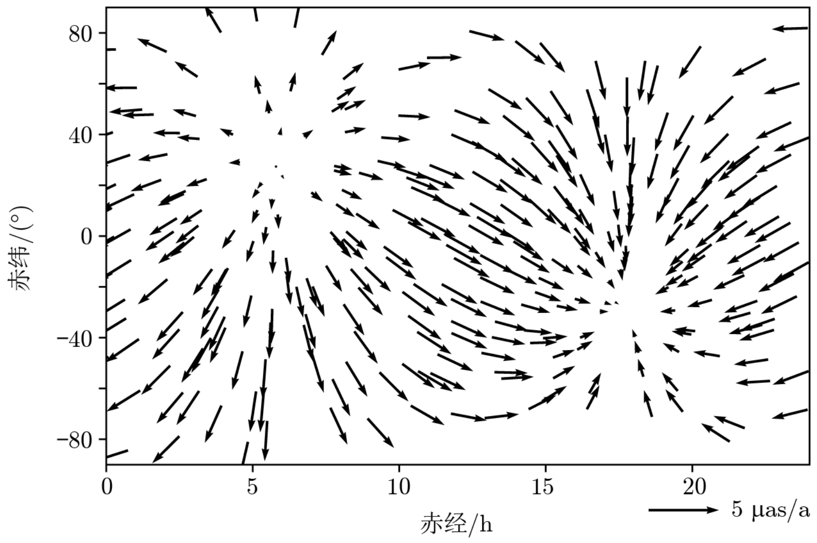
(1) J2015.0 对应源位置更接近于最新位置，这样除非是精度要求很高，在当前历元下使用 ICRF3 数据时，可以不考虑对位置进行银河系光行差相关的修正；

(2) J2015.0 是 ICRF3 观测的平均历元，其中 S/X 波段为 2014.5，K 波段为2016.7，X/Ka 波段为 2015.3；

(3) J2015.0 与当时 Gaia 发布的最新数据 (Gaia DR2) 的历元 J2015.5 很接近，为 ICRF3 与 Gaia-CRF 的链接提供了便利。

ICRF3 工作组解算得到的光行差常数大小为 (5.83 ± 0.23) μas/a，方向为 $\alpha_{\rm SSA} = 270.2° \pm 2.3°$, $\delta_{\rm SSA} = -20.2° \pm 3.6°$，与银心方向 $\alpha_{\rm G} = 266.4°$, $\delta_{\rm G} = -29.0°$ 相差不超过 10°。方向偏差的显著程度不超过 2.5σ，而这一矢量的大小是在 25σ 水平上解出来的，可信度远大于方向偏差，所以这里忽略光行差常数方向与银心方向之间的偏差，认为它指向银心[5]。

ICRF3 中采用的长期光行差效应大小 $A_{\rm G} = 5.8$ μas/a，方向指向银心。其对 ICRF3 S/X 波段的定义源在自行上的影响如图 8 中箭头所示。



注：箭头长度和方向分别代表自行的大小和方向，箭头长度和自行大小的比例见右下图例。

图 8　大小为 5.8 μas/a 方向指向银心的银河系光行差常数对 ICRF3 S/X 波段定义源自行的影响

不同工作求解出的长期光行差效应的大小和方向并不完全一致，因为使用的方法不同、数据不同和软件不同等都可能影响到解出的结果。另外，与其他很多类似的工作中一样，ICRF3 工作组的模拟中，除了指向银心的项 $A_{\rm G}$，还解出了其他方向的加速度。其中，与绕银心运动方向平行的加速度带来的视自行效应为 (0.8 ± 0.2) μas/a，误差与 $A_{\rm G}$ 的相当；垂直银盘方向的加速度带来的视自行效应为 (0.2 ± 0.6) μas/a，误差较大，这些效应的上限约为 25% $A_{\rm G}$[5]。造成上述结果的原因主要有 5 点[5]。

(1) 太阳系绕银心转动的同时还存在着相对于银盘的振动，振幅为 49 ∼ 93 pc，周期为 52 ∼ 74 Ma[86]。对应的垂直银盘方向加速度带来的视自行效应为 0.12 ∼ 0.18 μas/a[84]。

(2) 银河系被近邻星系吸引，也可能产生额外的加速度，引起视自行效应。能产生最明显影响的是距银河系 15.4 Mpc 处，质量为 $1.2 \times 10^{15} M_\odot$ 的室女座星系团，引起视自行效应大小约 0.015 μas/a[87]。但在现在的 VLBI 精度下，还不足以被探测到。

(3) 可能存在其他物理效应，导致不指向银心的加速度，具体还有待进一步的研究。

(4) 也可能是未建模的河外源结构效应导致的。

(5) 还可能与 VLBI 解算过程中的问题有关。

银河系光行差效应的影响随着观测时间的增加显得越发重要，更精确地求解这一效应的大小和方向，更好地理解偏离银心的项的含义，都将是未来的重点研究内容。

4.2 参考架之间的比较

精度在同一水平的参考架之间的比较可以相互验证它们自身的稳定性，还可以探究参考架中可能存在的系统误差。去除两星表间系统误差项后，还可以对共同源的位置差进行统计研究，讨论不同波段观测下源位置的差异及可能导致这些差异的原因。这一部分介绍了本文在比较两个参考架过程中采用的具体方法。

为了描述两个参考架之间的系统差异，这里使用的方法基于矢量球谐函数 (vector spherical harmonics, VSH) 的分解[88]。这一方法利用矢量球谐函数的前 2 阶分解项来描述两个星表之间的连接，其中包含了参考架指向的旋转、变形，以及一些区域误差。

具体表达式如下[88]：

$$\begin{aligned}\Delta\alpha\cos\delta = {} & R_1\cos\alpha\sin\delta + R_2\sin\alpha\sin\delta - R_3\cos\delta - D_1\sin\alpha + \\ & D_2\cos\alpha + M_{20}\sin 2\delta + (E_{21}^{\mathrm{Re}}\sin\alpha + E_{21}^{\mathrm{Im}}\cos\alpha)\sin\delta - \\ & (M_{21}^{\mathrm{Re}}\cos\alpha - M_{21}^{\mathrm{Im}}\sin\alpha)\cos 2\delta - 2(E_{22}^{\mathrm{Re}}\sin 2\alpha + \\ & E_{22}^{\mathrm{Im}}\cos 2\alpha)\cos\delta - (M_{22}^{\mathrm{Re}}\cos 2\alpha - M_{22}^{\mathrm{Im}}\sin 2\alpha)\sin 2\delta \quad ,\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}\Delta\delta = {} & -R_1\sin\alpha + R_2\cos\alpha - D_1\cos\alpha\sin\delta - D_2\sin\alpha\sin\delta + D_3\cos\delta + E_{20}\sin 2\delta - \\ & (E_{21}^{\mathrm{Re}}\cos\alpha - E_{21}^{\mathrm{Im}}\sin\alpha)\cos 2\delta - (M_{21}^{\mathrm{Re}}\sin\alpha + M_{21}^{\mathrm{Im}}\cos\alpha)\sin\delta - \\ & (E_{22}^{\mathrm{Re}}\cos 2\alpha - E_{22}^{\mathrm{Im}}\sin 2\alpha)\sin 2\delta + 2(M_{22}^{\mathrm{Re}}\sin 2\alpha + M_{22}^{\mathrm{Im}}\cos 2\alpha)\cos\delta \quad ,\end{aligned} \tag{16}$$

其中，R_i 项为旋转项，表示参考架的轴向偏差；D_i 项为偶极形变项，下面也简称其为形变项，它描述了区域误差和偶极场变形，长期光行差效应也会在这里体现出来；二阶项 E_{2i} 和 M_{2i} 描述了极向和环向四极矩形变，每一项分别包含实部和虚部。实际比较过程中，利用两星表的共同源的位置差，采用最小二乘法进行拟合来得到这些参数，并使用两星表中的位置误差进行加权来得到参数的误差。

某一天体在两星表中的位置分别为 (α_1, δ_1) 和 (α_2, δ_2)，则该源在星表二中相对于在星表一中，赤经、赤纬方向的位置差 $\Delta\alpha^*$、$\Delta\delta$ 分别为：

$$\Delta\alpha^* = (\alpha_2 - \alpha_1)\cos\delta_1 \quad , \tag{17}$$

$$\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1 \quad . \tag{18}$$

星表二中源位置相对星表一中源位置的角距 ρ 为：

$$\rho = \sqrt{(\Delta\alpha^*)^2 + (\Delta\delta)^2} \quad . \tag{19}$$

除此以外，在比较源位置时，还使用了归一化角距 X。赤经、赤纬方向的归一化角距 X_{α^*}

和 X_δ 由位置差比上相应的误差得到，表达式为：

$$X_{\alpha^*} = \frac{\Delta\alpha^*}{\sqrt{\sigma^2_{\alpha^*,1} + \sigma^2_{\alpha^*,2}}} \quad , \tag{20}$$

$$X_\delta = \frac{\Delta\delta}{\sqrt{\sigma^2_{\delta,1} + \sigma^2_{\delta,2}}} \quad , \tag{21}$$

其中，$\sigma_{\alpha^*,i}$ 和 $\sigma_{\delta,i}$ 分别为两星表中赤经、赤纬方向的位置误差。在此基础上，将两个星表中赤经赤纬间的相关系数 C_1、C_2 考虑在内，得到归一化角距 X[89]：

$$X^2 = \begin{bmatrix} X_{\alpha^*} & X_\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & C \\ C & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{\alpha^*} \\ X_\delta \end{bmatrix} \quad , \tag{22}$$

其中，

$$C = \frac{\sigma_{\alpha^*,1}\sigma_{\delta,1}C_1 + \sigma_{\alpha^*,2}\sigma_{\delta,2}C_2}{\sqrt{(\sigma^2_{\alpha^*,1} + \sigma^2_{\alpha^*,2})(\sigma^2_{\delta,1} + \sigma^2_{\delta,2})}} \quad . \tag{23}$$

如果假设两个星表赤经、赤纬方向的位置偏差均满足高斯分布，则 X^2 满足自由度为 2 的 χ^2 分布。在研究星表之间的系统差异时，一些由于观测和交叉认证时出现问题而呈现出特殊性质的源会对 VSH 拟合的解算结果产生一定影响，在对两个星表间的系统差进行分析时，这些特殊源就相当于统计样本中的野值，必须在进行 VSH 拟合前予以去除。X 的统计特性使得它可以作为寻找野值的标准之一。对于 N 个共同源组成的样本，设上限 X_0，使得归一化角距 X 超过 X_0 的源数目小于 1，即 $N \cdot \exp\left(-\frac{X_0^2}{2}\right) = 1$，则可以得到：

$$X_0 = \sqrt{2\ln N} \quad , \tag{24}$$

后面在进行星表间系统差计算时，将采用如下标准筛选出用于 VSH 拟合的源：

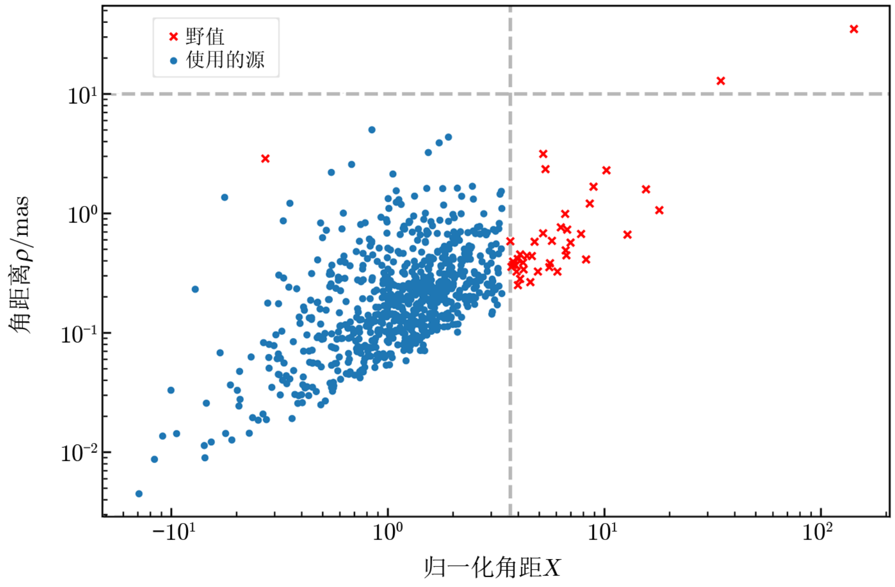
$$X \leqslant X_0 \quad , \quad \rho \leqslant 10 \text{ mas} \ , \tag{25}$$

$$\sigma_{\text{pos,max},1} \leqslant 10 \text{ mas} \ , \quad \sigma_{\text{pos,max},2} \leqslant 10 \text{ mas} \ , \tag{26}$$

以 ICRF3 S/X 波段和 K 波段的共同源为例，用蓝色圆点表示用于 VSH 拟合的源，红色叉代表被筛选出的野值，将它们的归一化角距 X 与角距 ρ 的分布展现在图 9 中。S/X 波段和 K 波段共同源共 793 个，$X_0 = 3.65$。由上述标准筛选出的野值共 41 个，它们绝大多数分布在除左下以外的三个区域，极个别误差较大的源虽然分布于左下区域，但仍被看作野值。图 9 显示，归一化角距 X 较大的源通常角距 ρ 也较大。

从两星表共同源中去除野值后，我们还将利用余下共同源拟合来得到前两阶 VSH 系数作为两星表间的系统误差，在此基础上对全体共同源去除系统误差后，统计它们的位置差角距 ρ 和归一化角距 X 角距的分布，从统计角度讨论不同波段参考架中源位置的差异。

对处于不同参考架下两组源的位置信息进行比较，或将不同参考架的数据整合在一起研究时，也需要先利用 VSH 拟合得到的参考架之间的转换系数来去除两组数据间由参考



注：图中虚线标出了 $X = X_0$ 和 ρ =10 mas 的位置。

图 9　ICRF3 S/X 波段与 K 波段共同源经过筛选后得到的野值以及用于 VSH 拟合的源的角距 ρ 随归一化角距 X 的分布

架差异引起的系统差。下面在进行参考架的比较时，关注参考架中所有源的整体性质，拟合 VSH 系数时利用了星表之间的全部共同源。但只关心参考架本身的系统差别时，仅采用 ICRF 之间的共同定义源，或 ICRF 中定义源与其他星表的共同源来拟合 VSH 系数才是更恰当的。

除了表 3 给出的两星表间所有共同源的 VSH 拟合结果，表 4 还给出 ICRF3 S/X 波段分别与 ICRF2、ICRF3 K 波段以及 ICRF3 X/Ka 波段共同定义源拟合得到的转换系数大小和误差，以及 ICRF3 中三个参考架定义源与 Gaia-CRF3 共同源拟合得到的结果。拟合使用的源数目的减少导致拟合结果的误差比使用全部共同源时要大，但拟合结果本身没有明显的 (超过 2σ 范围) 区别。在使用时，可以根据实际需要选择 VSH 拟合时使用的源。

4.2.1　ICRF3 S/X 与 ICRF2

与 ICRF3 不同，ICRF2 仅包含 S/X 波段，所以这里也将属于同一波段的 ICRF3 S/X 波段参考架与 ICRF2 进行比较。两星表的共同源共 3 388 个，这些源在赤经、赤纬方向误差以及位置误差椭圆半长轴的统计分布直方图见图 10。随着 VLBI 观测数据的积累，ICRF3 S/X 较 ICRF2 整体精度均有明显提高，赤经方向，最大峰对应的误差由 0.4 mas 减小到 0.1 mas 左右，赤纬方向也由 0.8 mas 左右减小到 0.2 mas 左右。同时，两代参考架都具有赤纬方向位置误差大于赤经方向的特点，这是由 VLBI 观测网形状决定的。还可以注意到 ICRF3 S/X 波段和 ICRF2 共同源的位置误差分布中都存在两个峰，如前面在分析 ICRF3 S/X 波段位置误差时提到的那样，它们由小到大分别由同时被 IVS 组织下的 VLBI

表 3 ICRF3 S/X 波段参考架分别与 ICRF2, ICRF3 K 及 ICRF3 X/Ka 参考架的共同源，以及 Gaia EDR3 分别与 ICRF3 中各波段参考架的共同源进行 VSH 前两阶系数拟合得到的转换系数大小

μas

		ICRF3 S/X 与			Gaia EDR3 与		
	参数	ICRF2	ICRF3 K	ICRF3 X/Ka	ICRF3 S/X	ICRF3 K	ICRF3 X/Ka
	Nb_{common}	3 388	793	638	3 141	645	574
	Nb_{outliers}	273	41	237	551	101	166
	Nb_{used}	3 115	752	401	2 590	544	408
旋转	R_1	11 ± 4	3 ± 8	-20 ± 10	0 ± 7	-28 ± 13	33 ± 14
	R_2	14 ± 4	-7 ± 7	-5 ± 9	12 ± 7	26 ± 13	17 ± 14
	R_3	-1 ± 3	-2 ± 4	4 ± 7	-2 ± 6	14 ± 9	-10 ± 12
滑行	D_1	22 ± 4	-7 ± 7	4 ± 8	7 ± 7	20 ± 12	19 ± 14
	D_2	63 ± 4	39 ± 7	29 ± 8	1 ± 6	-44 ± 12	-34 ± 13
	D_3	89 ± 4	27 ± 7	-253 ± 10	-3 ± 7	-17 ± 12	207 ± 14
四极项	E_{20}	-43 ± 4	-15 ± 9	60 ± 13	-32 ± 8	-20 ± 15	-82 ± 18
	M_{20}	-4 ± 4	-28 ± 5	159 ± 9	-10 ± 7	24 ± 11	-154 ± 16
	E_{21}^{Re}	13 ± 4	-22 ± 8	-13 ± 10	-2 ± 8	21 ± 14	31 ± 16
	E_{21}^{Im}	-4 ± 5	-47 ± 8	23 ± 10	-16 ± 8	15 ± 15	-48 ± 17
	M_{21}^{Re}	0 ± 4	20 ± 8	2 ± 9	-6 ± 8	-66 ± 14	-44 ± 17
	M_{21}^{Im}	5 ± 4	-25 ± 8	6 ± 9	-15 ± 8	-3 ± 15	-45 ± 17
	E_{22}^{Re}	0 ± 2	-7 ± 3	-3 ± 4	-11 ± 4	4 ± 6	0 ± 8
	E_{22}^{Im}	-2 ± 2	-8 ± 3	3 ± 4	1 ± 4	11 ± 6	-4 ± 8
	M_{22}^{Re}	3 ± 2	11 ± 4	-1 ± 6	7 ± 4	-9 ± 7	-5 ± 9
	M_{22}^{Im}	0 ± 2	-3 ± 4	4 ± 6	0 ± 4	5 ± 7	12 ± 9

常规观测和 VLBA 观测的源，以及主要只被 VLBA 观测的源组成。ICRF3 S/X 波段对比前代参考架，两个峰最高点对应的误差值都有所减小，而其中较大的峰的最高点存在明显的后移，形状也变得更加紧凑，可见 VLBA 近几年的观测对源位置精度的提高起到了很重要的贡献。

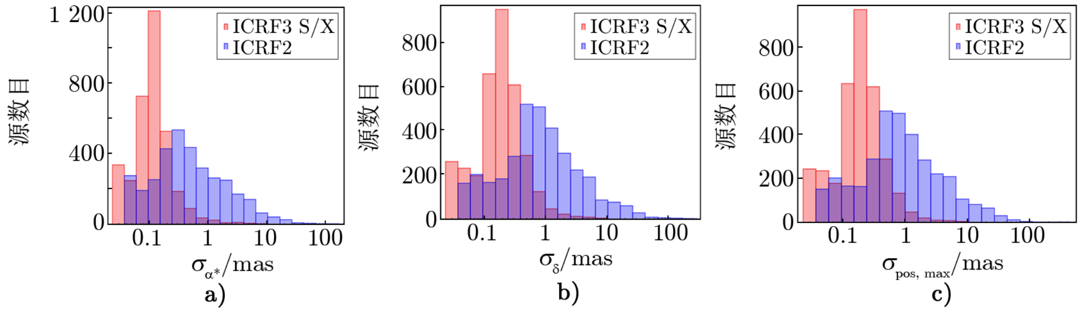
接下来按照前文描述的标准，ICRF2 与 ICRF3 S/X 波段间共同源中有 273 个源可视为野值，利用余下的 3 115 个源的位置差拟合了矢量球谐函数前两阶展开式中的参数，见表 3。拟合得到，旋转项都在 15 μas 以下，因为 ICRF3 S/X 正是校准到 ICRF2 方向上的，所以相对没有明显旋转也是意料之中的。而形变项却较大，D_2 和 D_3 分别为 (-63 ± 4) μas 和 (-89 ± 4) μas，这表明两个星表之间存在偶极场形变。而二阶项中，除了 E_{20} 较为明显，为 (43 ± 4) μas，其他项均在 10 μas 以下。

由于银河系光行差给源位置带来的影响就呈现出偶极场的形态[77]，而且 ICRF2 包含的观测资料的观测跨度也达到了 30 年，所以有理由怀疑 ICRF2 解算时未考虑银河系光行差效应是导致它与 ICRF3 S/X 波段参考架之间存在较大的偶极形变项的原因。而且 Mignard 等人在 2016 年的工作[90]中也注意到 ICRF2 与 Gaia DR1 中的河外源之间存在着形变，并

表 4　ICRF3 S/X 波段参考架定义源分别与 ICRF2, ICRF3 K 以及 ICRF3 X/Ka 参考架中定义源的共同源，以及 Gaia EDR3 分别与 ICRF3 中各波段参考架中定义源的共同源进行 VSH 前两阶系数拟合得到的转换系数大小和误差

μas

	参数	ICRF3 S/X 与 ICRF2	ICRF3 S/X 与 ICRF3 K	ICRF3 S/X 与 ICRF3 X/Ka	Gaia EDR3 与 ICRF3 S/X	Gaia EDR3 与 ICRF3 K	Gaia EDR3 与 ICRF3 X/Ka
	Nb_{common}	165	193	176	259	166	151
	Nb_{outliers}	14	5	105	61	24	68
	Nb_{used}	151	188	71	198	142	83
旋转	R_1	8 ± 6	2 ± 11	-35 ± 21	12 ± 13	-9 ± 21	1 ± 30
	R_2	15 ± 6	3 ± 12	-28 ± 17	14 ± 13	3 ± 22	3 ± 27
	R_3	-7 ± 5	0 ± 6	4 ± 7	-7 ± 13	-8 ± 16	-23 ± 26
滑行	D_1	24 ± 6	-13 ± 10	-25 ± 16	18 ± 13	37 ± 20	29 ± 30
	D_2	62 ± 6	32 ± 10	14 ± 13	-34 ± 14	-50 ± 20	-56 ± 27
	D_3	83 ± 6	35 ± 11	-237 ± 25	15 ± 12	-15 ± 20	235 ± 26
四极项	E_{20}	-47 ± 7	-22 ± 13	91 ± 26	-26 ± 15	-15 ± 26	-84 ± 36
	M_{20}	-4 ± 6	-19 ± 8	111 ± 19	-20 ± 15	5 ± 20	-137 ± 34
	E_{21}^{Re}	14 ± 8	-27 ± 12	-1 ± 18	-1 ± 17	12 ± 26	-20 ± 31
	E_{21}^{Im}	1 ± 7	-50 ± 12	-2 ± 24	-24 ± 16	34 ± 24	-16 ± 34
	M_{21}^{Re}	3 ± 7	15 ± 12	1 ± 15	-28 ± 18	-73 ± 27	-78 ± 33
	M_{21}^{Im}	18 ± 7	-35 ± 12	24 ± 19	-19 ± 16	-44 ± 25	-29 ± 34
	E_{22}^{Re}	3 ± 4	-2 ± 4	-3 ± 10	1 ± 9	2 ± 11	20 ± 18
	E_{22}^{Im}	-2 ± 3	-11 ± 4	-12 ± 10	8 ± 8	7 ± 11	-2 ± 16
	M_{22}^{Re}	1 ± 4	13 ± 6	-6 ± 13	22 ± 8	5 ± 12	3 ± 18
	M_{22}^{Im}	6 ± 4	1 ± 6	11 ± 13	-7 ± 8	4 ± 12	-7 ± 16



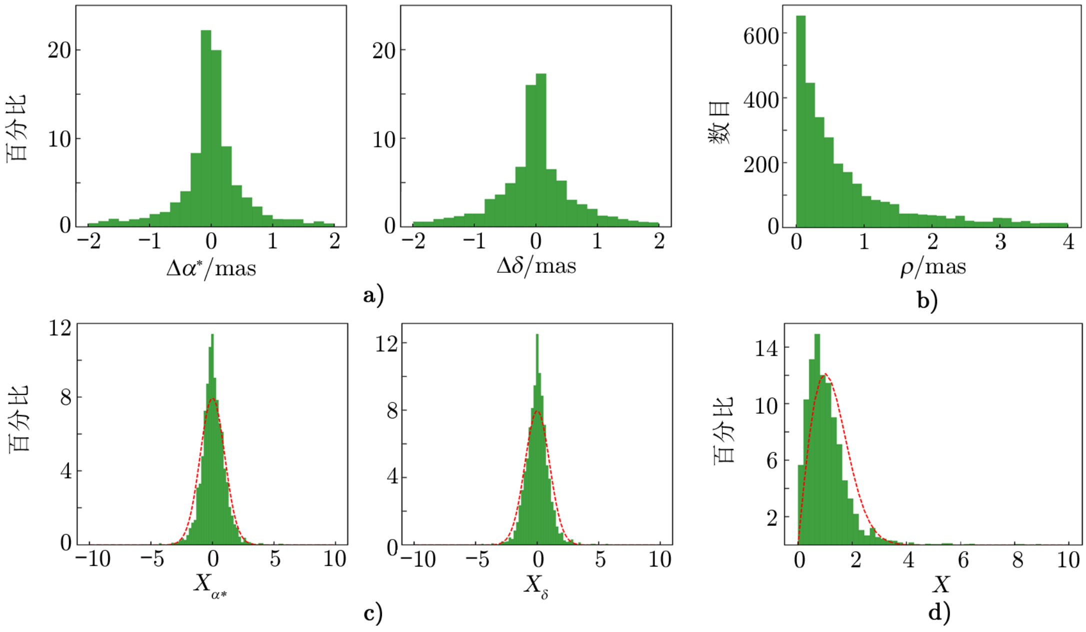
注：a) 赤经方向的位置精度；b) 赤纬方向的位置精度；c) 位置误差椭圆半长轴的频数。图中 ICRF3 S/X 与 ICRF2 数据分别用蓝色和红色柱体表示。

图 10　ICRF3 S/X 波段参考架与 ICRF2 的共同源在赤经、赤纬方向的位置精度，以及位置误差椭圆半长轴的频数分布直方图

将银河系光行差效应作为解释这一现象的可能理由之一。为了验证这一猜想，Charlot 等人[5]将银河系光行差效应考虑在内，重新解算了 ICRF2 使用的 VLBI 观测数据，得到了一个改良版的 ICRF2，并再次拟合了矢量球谐函数前两阶参数。拟合后，旋转项仍然保持在很小的范围内，二阶项也没有明显变化，但偶极形变项明显减小。D_2 几乎为 0，D_3 也减小到 (-39 ± 4) μas。这一结果证明了前面的猜想，银河系光行差效应确实是导致 ICRF2 与 ICRF3 S/X 波段参考架之间产生偶极形变的重要原因。

需要注意的是，历代国际天球参考架中，只有 ICRF3 在解算过程中考虑了银河系光行差的影响，所以产生了位置历元的概念。如果在使用前代参考架的同时希望考虑到这一效应，不能直接对源位置进行变换，而需要加入对银河系光行差效应的建模重新解算对应的观测数据，因为对前代参考架来说，河外源不存在位置历元的概念。

图 11 展示了去除系统差后，ICRF2 与 ICRF3 S/X 波段参考架共同源在两星表间的位置差分布。可以看到，两星表间源位置基本一致，有约 89.5% 的源赤经方向位置差在 2 mas 范围内，约 83.6% 的源赤纬方向位置差在 2 mas 范围内。赤经、赤纬方向的归一化角距基本符合高斯分布，X 的峰值在 0.8 左右。



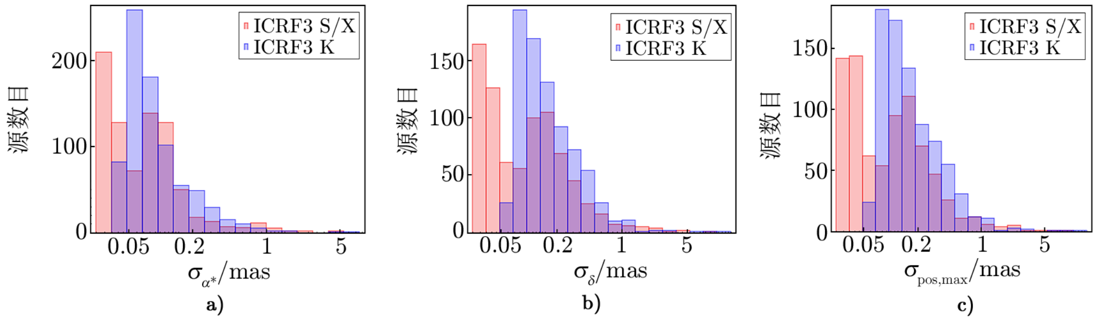
注：a) 赤经、赤纬方向位置坐标差的分布，b) 共同源在两星表位置间的角距分布，c) 赤经、赤纬方向归一化角距的分布，d) 总的归一化角距分布。有部分位置误差较大的源超出了坐标轴的范围，a)−d) 中分别有 356、554 个，381 个，8、11 个，13 个。

图 11　ICRF2 与 ICRF3 S/X 波段参考架的共同源的位置差分布

4.2.2 ICRF3 三个波段参考架

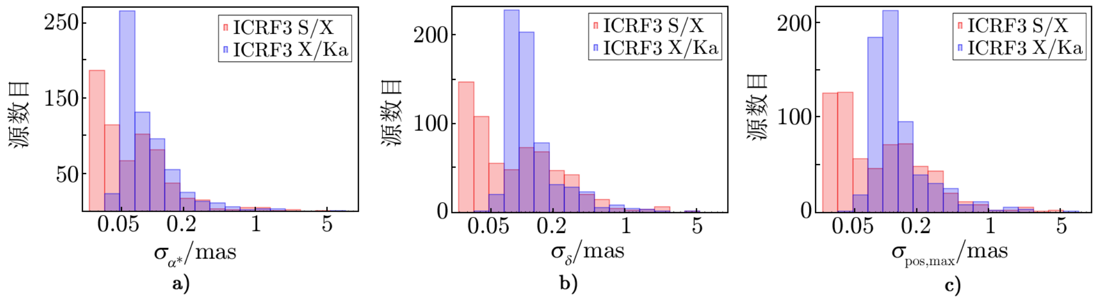
ICRF3 三个波段参考架的解算是分别独立进行的，可以通过它们之间的比较检验它们之间的一致性以及反映出三个参考架各自存在的系统误差。这里将源数目最多的 S/X 波段参考架与两个更高频率的参考架进行了比较。

S/X 波段与 K 波段共同源有 793 个，与 X/Ka 波段共同源 638 个。我们首先比较了 S/X 波段与 K 波段参考架的共同源、S/X 波段与 X/Ka 波段参考架的共同源的位置误差。赤经、赤纬方向误差以及位置误差椭圆半长轴的统计直方图如图 12 和图 13 所示。



注：a)、b) 分别为赤经、赤纬方向位置精度，c) 位置误差椭圆半长轴的频数分布直方图。

图 12　ICRF3 S/X 波段与 K 波段参考架的793 个共同源在赤经、赤纬方向的位置精度，以及位置误差椭圆半长轴的频数分布直方图



注：a)、b) 分别为赤经、赤纬方向位置精度，c) 位置误差椭圆半长轴的频数分布直方图。4 个位置误差超过 10 mas 的源在图中没有显示出来。

图 13　ICRF3 S/X 波段与 X/Ka 波段的 638 个共同源在赤经、赤纬方向的位置精度，以及位置误差椭圆半长轴的频数分布直方图

与 ICRF3 三个波段所有源的误差分布情况类似，S/X 波段的频数分布直方图中有两个峰，K 波段只有一个峰，位于 S/X 波段的两个峰之间。但相比 S/X 波段所有源的误差分布，对应误差值较大的峰相对高度有所降低，这是因为共同源中 S/X 波段主要只被 VLBA 观测的源所占的比例有所减少。将 S/X 波段与 K 波段共同源位置误差的中位数进行对比，可以发现 S/X 波段的更小，两个波段共同源在赤经、赤纬方向的位置误差中位数：S/X 波段的是 63 μas 和 87 μas，K 波段的是 73 μas 和 134 μas；位置误差椭圆半长轴的中位数分

别约 91 μas 和 137 μas。

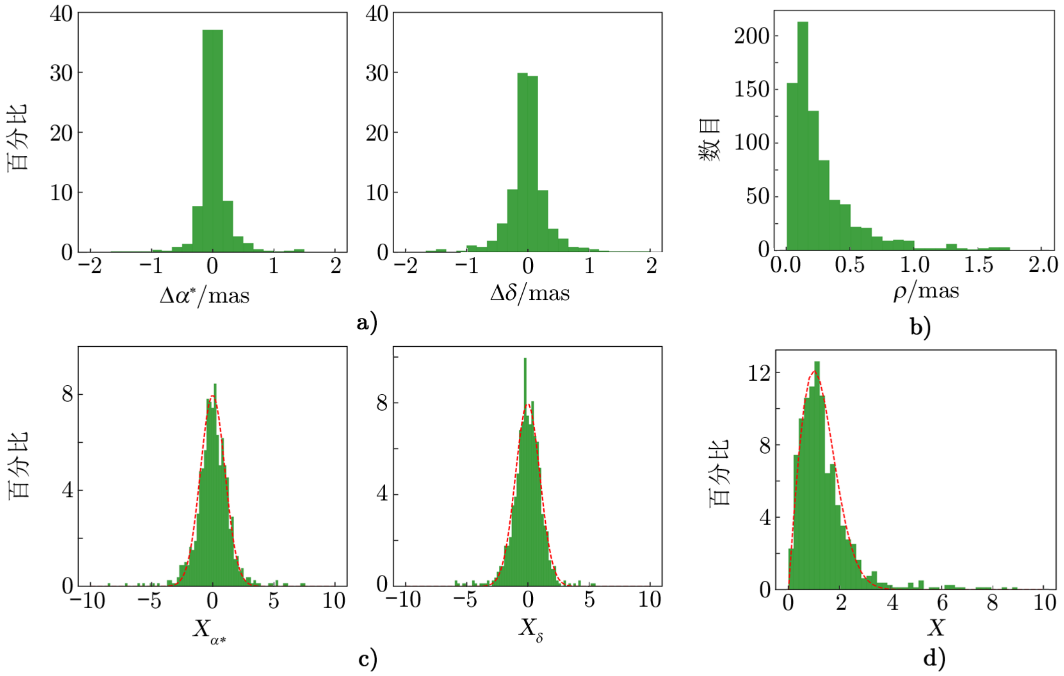
S/X 波段与 X/Ka 波段参考架共同源的位置误差分布情况与前面描述的类似。相比 S/X 波段与 K 波段参考架的共同源，S/X 波段与 X/Ka 波段参考架的共同源里，S/X 波段中主要由 VLBA 观测的源比例更小，第二个峰更加不明显。两个波段共同源在赤经方向的误差中位数分别约为 52 μas 和 73 μas，赤纬方向误差中位数分别约为 69 μas 和 102 μas，位置误差椭圆半长轴的中位数分别约为73 μas 和 111 μas。S/X 波段的位置精度略高。

研究 ICRF3 S/X 波段参考架与其他两个更高频率参考架之间的系统误差时，也使用了去除野值后的共同源在两星表间的位置差拟合得到的矢量球谐函数的前两阶系数。经过筛选，S/X 波段与 K 波段的共同源剩余 752 个，占共同源总数的 97%；而 S/X 波段与 X/Ka 波段的共同源只剩余 401 个，约为共同源总数的 63%。

拟合结果见表 3 第 3、4 列。可以看到，S/X 波段与 K 波段和 X/Ka 波段间旋转项均在比较低的水平，除了 S/X 与 X/Ka 波段间 R_1 项为 (-20 ± 10) μas 以外，其他旋转项均在 10 μas 以下。在解算 K 波段和 X/Ka 波段参考架时，利用它们与 S/X 波段定义源的共同源来将两个高频率参考架校准到 S/X 波段参考架的指向上，所以三个参考架之间没有明显旋转也是意料之中的结果。偶极形变项 D_i 和四级矩在两个高频参考架与 S/X 波段参考架的比较中呈现出不同的结果。K 波段与 S/X 波段参考架比较得到的几乎所有偶极和四级形变项都在 50 μas 范围内，其中较大的几项分别为 $D_2 = (39 \pm 7)$μas, $M_{20} =(-28 \pm 5)$μas, $E_{21}^{\rm Im} =(-47 \pm 8)$μas。它们的大小与 K 波段参考架本底噪声 (赤经方向 30 μas，赤纬方向 50 μas) 大小相当，由于 K 波段观测网缺失在南半球高纬地区的观测台站，相对 S/X 波段参考架存在一定的形变也是可以理解的。而 X/Ka 波段则显示出更强的形变，其中较为突出 (大于 50 μas) 的几项为 $D_3 =(-253 \pm 10)$μas, $E_{20} =(60 \pm 13)$μas, $M_{20} = (159 \pm 9)$μas。X/Ka 波段观测台站只有 4 个，几何结构比较简单，观测也多为单基线观测，这可能是导致其与 S/X 波段参考架间存在较明显形变的原因，也是 X/Ka 波段参考架在未来发展中亟待解决的问题。

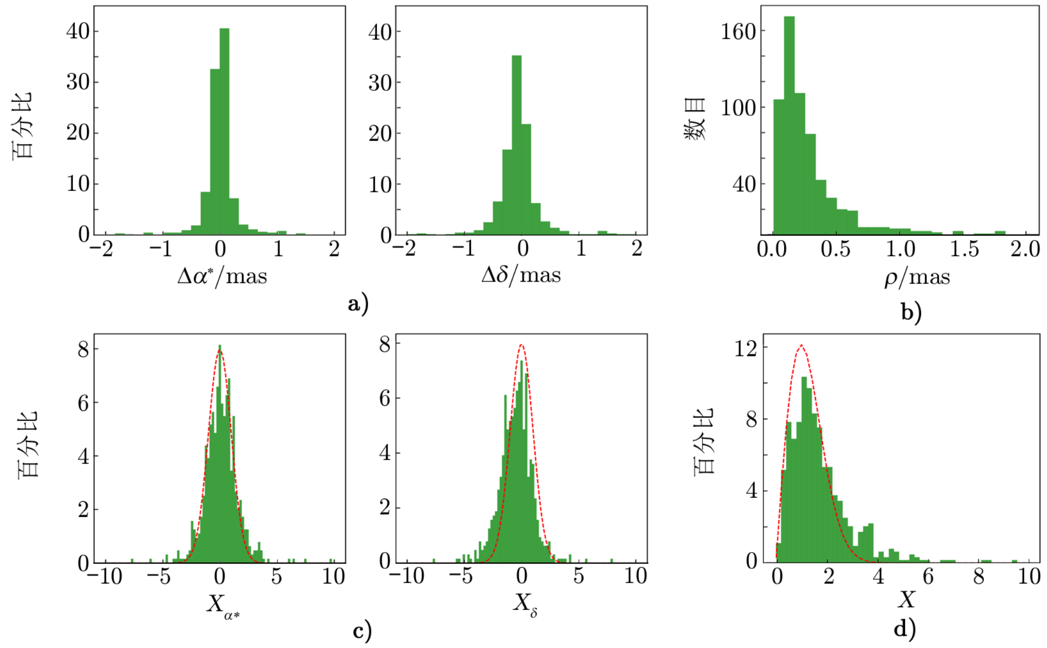
接下来，将目光转向 S/X 波段参考架与两个高频参考架共同源之间的位置差的比较。由图 14 和图 15 可知，S/X 波段参考架与两个高频率波段参考架的共同源角距大多分布在 1 mas 以下，峰值对应的角距的范围都为 0.15 ∼ 0.25 mas，与位置误差椭圆半长轴的中位数基本一致。除了少数归一化角距较大的源，S/X 波段与 K 波段共同源在赤经、赤纬方向的归一化角距符合高斯分布，X 分布也基本符合瑞利分布，峰值约为 1。这说明 K 波段与 S/X 波段共同源的位置相互符合得很好。

S/X 波段与 X/Ka 波段共同源赤经方向的归一化角距基本符合高斯分布；赤纬方向的归一化角距在去除两星表间系统差之前存在非常明显的偏移，去除系统差后偏移有所改善，但仍然存在。X 的分布与瑞利分布的偏移也比 S/X 波段和 K 波段的共同源的明显，X 峰值对应 1.5 左右。X/Ka 波段归一化角距偏大的原因可能与 X/Ka 波段误差被低估，或 X/Ka 波段中仍然存在的系统偏差有关。



注：a)−d) 所示与图 11 相同。有部分位置误差较大的源超出了坐标轴的范围，a)−d) 分别为 3、9 个，13 个，5、3 个，6 个。

图 14　ICRF3 S/X 波段与 K 波段参考架的共同源的位置差分布



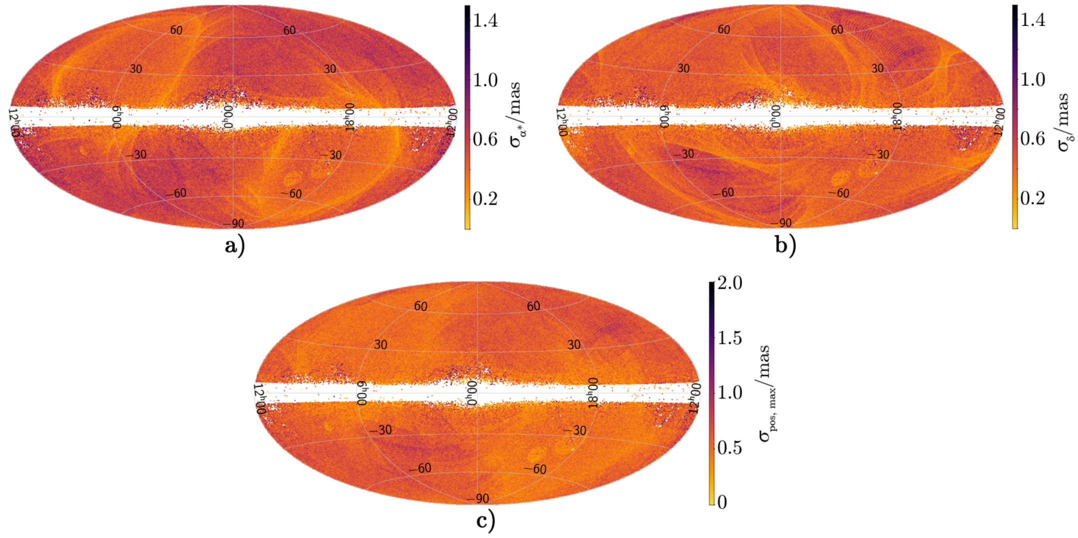
注：a)−d) 所示与图 11 相同。有部分位置误差较大的源超出了坐标轴的范围，a)−d) 分别为 7、9 个，16 个，4、2 个，6 个。

图 15　ICRF3 S/X 波段与 X/Ka 波段参考架的共同源的位置差分布

4.2.3　ICRF3 与 Gaia EDR3

Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3) 是欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 的第二代天体测量卫星 Gaia 于 2020 年发布的最新一批数据 Gaia EDR3 对应的参考架。作为第三批正式数据的雏形，Gaia EDR3 由 34 个月的观测数据组成，其中包含对星等分布在 $3 \sim 21$ mag 的 18 亿个源在光学波段的观测，为 14.68 亿个源提供包含位置、视差和自行的五参数天体测量信息，为 15.44 亿个源仅提供位置坐标信息。Gaia EDR3 对应的位置历元为 2016.0[91]。

Gaia EDR3 包含 1 614 173 个类星体，它们共同构成 ICRS 在光学波段的实现 Gaia-CRF3。这些源的认证是通过将 Gaia EDR3 数据与 17 个外部活动星系核星表进行交叉比对所完成，其赤经、赤纬方向位置误差以及位置误差椭圆半长轴在天球上的分布见图 16。考虑到 Gaia 卫星的观测特点，这里采用银道坐标系。银道坐标系中不同位置处的源一定时间内被扫描观测的次数不同，位置精度自然也有不同。靠近银盘处，明亮恒星的密集分布以及银河系消光现象严重影响了对类星体的观测，使得这些区域类星体数目很少。

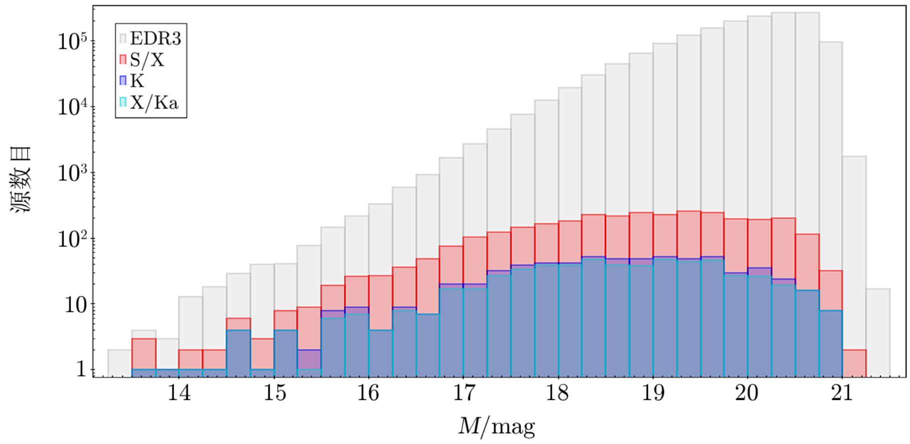


注：a) 赤经误差；b) 赤纬误差；c) 位置误差椭球半长轴大小。图中采用银道坐标系。赤经、赤纬误差最大显示到 1.5 mas，误差椭球半长轴最大显示到 2.5 mas。

图 16　Gaia EDR3 中类星体赤经误差、赤纬误差以及位置误差椭球半长轴大小在天球上的分布

Gaia EDR3 类星体的星等分布在 $13 \sim 21$ mag 内，见图 17 中灰色部分。15 mag 以下类星体数目很少；在低于 21 mag 的区域，类星体数目随星等增大而增加；在 21 mag 左右以及高于 21 mag 的区域，由于接近 Gaia 的观测极限，类星体数目有所下降。Gaia 卫星观测到的源的天体测量参数精度主要与星等有关，越暗的源观测精度通常也越低[91]。

Gaia EDR3 中对类星体天体测量参数的解算分为五参数解和六参数解。较为明亮的类星体的颜色信息可以直接通过观测得到，即有效波数 (υ_{eff})；这类源进行天体测量解算时未知量包括位置坐标 (2 个)，视差 (1 个) 以及自行 (2 个) 一共 5 个参数，所以这种解被称为五



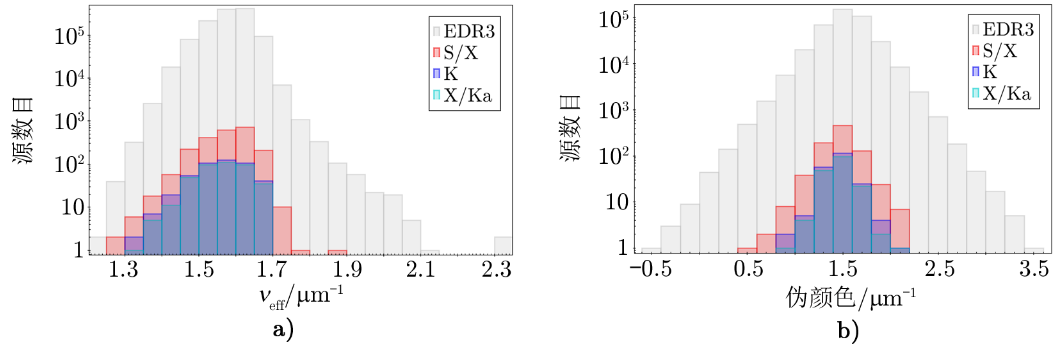
注：Gaia EDR3 中的类星体用灰色表示，S/X 波段与 Gaia EDR3 共同源用红色，K 波段为蓝色，X/Ka 波段为绿色。

图 17 Gaia EDR3 中全部类星体及其与 ICRF3 三个波段参考架共同源的星等频数分布直方图

参数解。另外还有一部分源，由于比较昏暗，目前还没有观测到足够可靠的颜色信息，所以需要将它们的颜色信息也看成一个未知数，即伪颜色 (pseudocolour) 。伪颜色与前面提到的参数一起求解，使未知数个数增加到 6 个，故这类解被称为六参数解[92]。由于采用六参数解的源都比采用五参素解的源暗，它们的天体测量参数精度也稍差一些[91]。Gaia EDR3 中的类星体有 1 215 942 个采用五参数解，398 231 个采用六参数解，它们的颜色信息见图 18 中灰色部分。采用五参数解的源的有效波数分布在 1.2 ~ 2.3 μm^{-1}，中位数为 1.582 38 μm^{-1}；采用六元素解的源伪颜色分布在 −0.47 ~ 3.5 μm^{-1} 范围内，中位数为 1.535 12 μm^{-1}。从图 18 可以看到，两者频数分布直方图的最高点对应范围相似，但分布形状完全不同。采用五参数解与采用六参数解的源的颜色信息来源有着本质的不同：前者是观测得到，后者是拟合得来的，所以一般涉及到颜色信息时也会将五参数解与六参数解分开讨论。

将 EDR3 的类星体星表与 ICRF3 三个波段参考架认证得到分别的共同源，在 S/X 波段有 3 141 个，K 波段共 645 个，X/Ka 波段 574 个。它们的星等分布见图 17 中红色、蓝色、绿色的柱体。ICRF3 和 Gaia EDR3 共同源的星等分布与 Gaia EDR3 中所有类星体的星等分布相似，但分布相对更均匀。这三组源的颜色信息见图 18 所示，ICRF3 三个波段与 Gaia EDR3 的共同源在颜色分布上也是类似的。其中，采用五参数解的源分布在 1.28 ~ 1.85 μm^{-1} 之间，相对 EDR3 全体类星体偏红；采用六参数解的源分布在 0.56 ~ 2.20 μm^{-1} 范围内，没有明显偏差。

ICRF3 三个波段与 Gaia EDR3 的共同源在赤经、赤纬方向上的位置误差和位置误差椭圆半长轴大小分布见图 19，位置误差中位数见表 5。Gaia EDR3 星表中给出了由五个天体测量参数及它们之间的相关系数计算得到的最大误差 (astrometric_sigma5d_max)，但这里为了与 ICRF3 中位置误差椭圆半长轴的概念一致，图和表中的 $\sigma_{\rm pos,max}$ 为仅考虑赤经、赤纬方向误差和它们之间的相关系数计算得到的量。由表 5 可知，ICRF3 的位置误差中位数与 Gaia EDR3 的较为接近。通过它们的位置误差频数分布直方图也可以得到类似结论。



注：Gaia EDR3 中所有五参数或六参数用灰色表示，ICRF3 S/X 波段用红色表示，K 波段用蓝色，X/Ka 波段用绿色表示。

图 18　Gaia EDR3 中所有有五参数或六参数解的源，及 Gaia EDR3 与 ICRF3 三个波段参考架分别的共同源的有效波数和伪颜色的分布

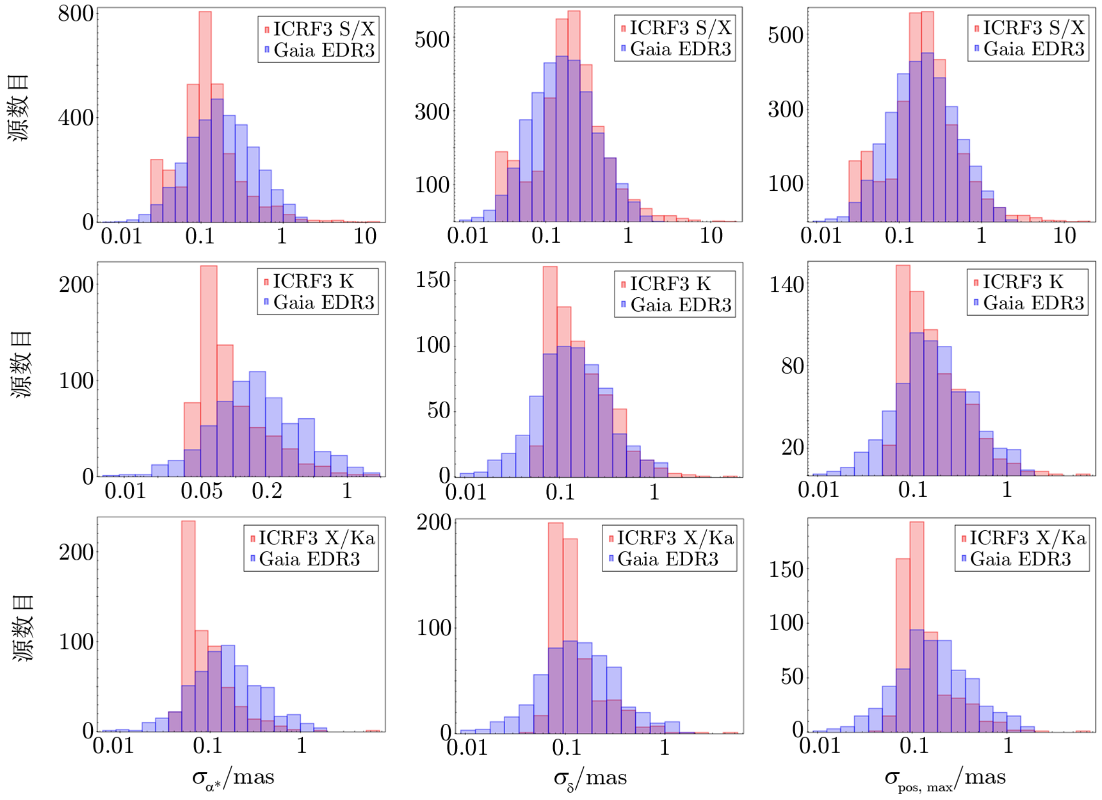


图 19　ICRF3 S/X、K、S/Ka 波段参考架与 Gaia EDR3 共同源在两个星表中的赤经、赤纬方向位置误差，以及位置误差椭圆半长轴的频数分布直方图

表 5　ICRF3 各波段参考架与 Gaia EDR3 中的共同源的位置误差中位数　μas

	在 EDR3 中所有 AGNs	Gaia EDR3 与 ICRF3 的共同源					
		S/X	EDR3	K	EDR3	X/Ka	EDR3
$\sigma_\alpha \cos\delta$	146	114	176	70	151	74	150
σ_δ	122	194	162	136	133	103	134
$\sigma_{\rm pos,max}$	161	197	194	139	164	111	164

ICRF3 与 Gaia EDR3 观测波段、观测设备、解算方法都不一样，但位置精度水平基本一致，将 ICRF3 各波段参考架与 Gaia EDR3 中的类星体星表进行比较，应该可以较好地反映出它们各自存在的系统差。

接下来，从 ICRF3 三个波段参考架与 Gaia EDR3 的共同源中，按照第 4.2 节中介绍的标准去除野值，进行 VSH 拟合。拟合使用的源数目以及拟合得到的结果见表 3 中最后 3 列所示。

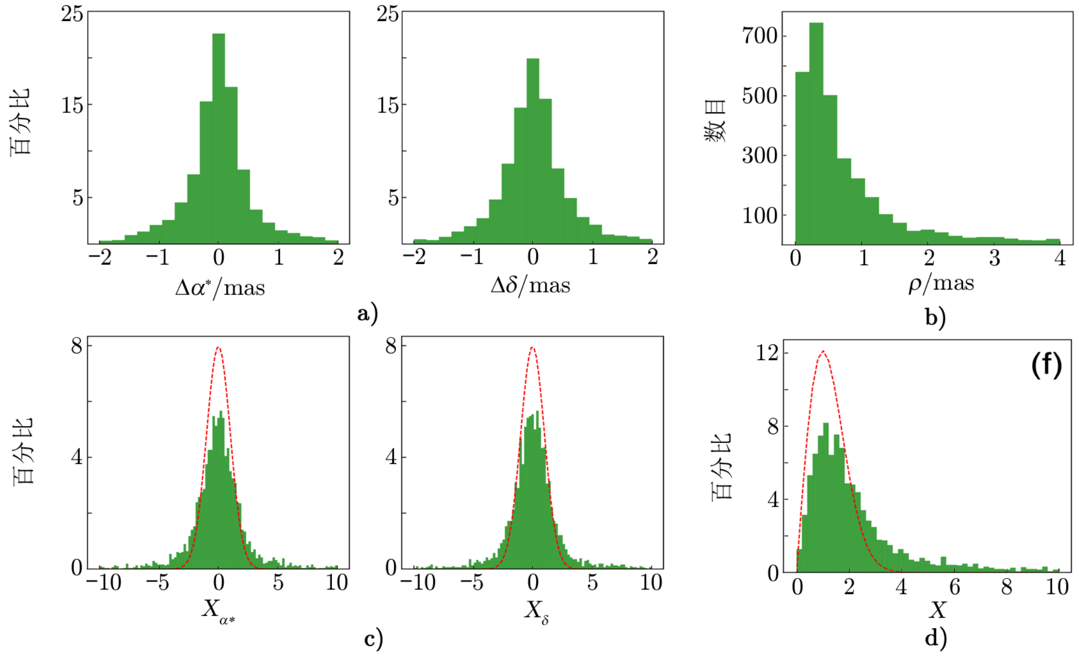
S/X 波段与 Gaia EDR3 拟合使用的源有 2 590 个，占共同源总数约 82%。除了 E_{20} 项，其他系数均在 20 μas 以下。这说明两个参考架非常接近，没有明显的系统差别。这也间接证明了 ICRF3 S/X 波段参考架的可靠性。

K 波段与 Gaia EDR3 拟合时使用的源数目为 544 个，占共同源总数约 84%。拟合得到的 VSH 系数比 S/X 波段得到的更大，较为明显的是 D_2 项和 $M_{21}^{\rm Re}$ 项，分别为 $(-44{\pm}12)$ μas 和 (-66 ± 14) μas，说明 K 波段参考架与 Gaia EDR3 之间仍存在一定的区域误差。除这两项外，其他系数均在 30 μas 以下，说明两星表总体较为一致。

X/Ka 波段与 Gaia EDR3 拟合时使用的源为 408 个，仅占总数的 71%。大于 50 μas 的几项分别为 D_3，M_{20} 和 E_{20}，对应大小分别为 (207 ± 14) μas, (-154 ± 16) μas 以及 (-82 ± 18) μas。反映出 X/Ka 波段星表中存在的较为明显的系统误差和区域误差。这一结果与 X/Ka 波段和 S/X 波段比较时得到的类似，由于 S/X 波段星表与 Gaia EDR3 星表基本一致，这一结果也是可以预料的。

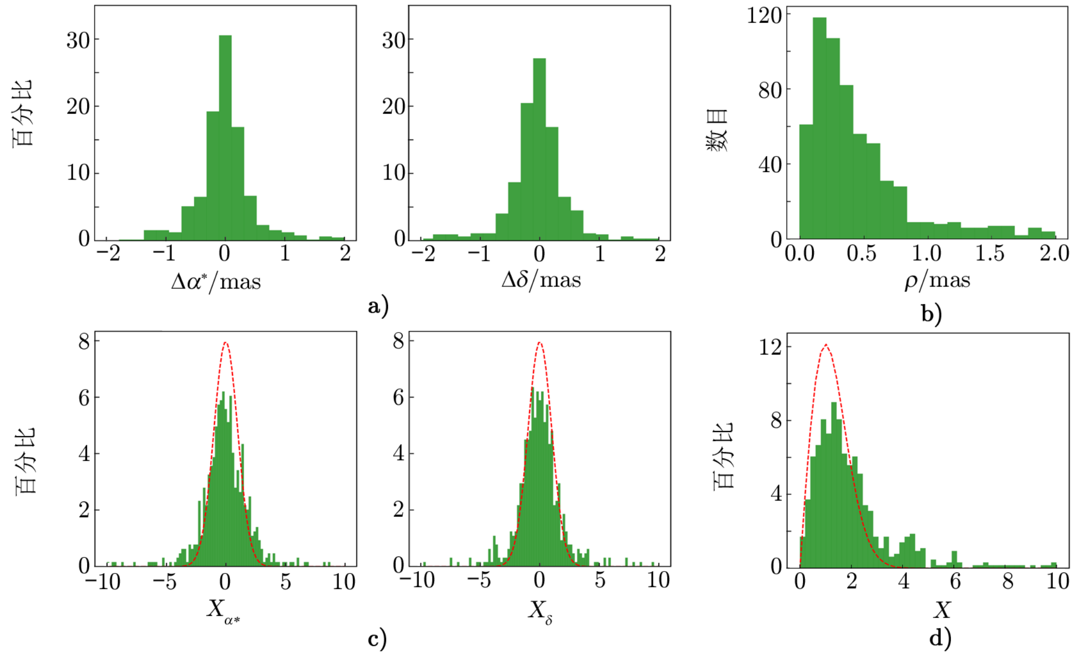
利用上面的 VSH 拟合结果，去除 ICRF3 三个波段相对 Gaia EDR3 星表的系统误差，对三个波段参考架分别与 Gaia EDR3 的共同源的位置进行了比较。共同源在赤经与赤纬方向的位置差、角距、赤经与赤纬方向归一化角距以及总的归一化角距的统计直方图分别见图 20、图 21、图 22。可以看到，三个波段相对 Gaia EDR3 星表共同源的位置差基本分布在 2 mas 范围内，角距峰值对应 $0.10 \sim 0.25$ mas，与两个星表位置误差椭圆半长轴的中位数基本一致。由归一化角距的统计直方图可知，除了 X/Ka 波段赤纬方向的归一化角距外，都相对 y 轴呈对称分布。X/Ka 波段赤纬方向的归一化角距在利用 VSH 拟合结果去除其与 Gaia EDR3 之间的系统差前存在较明显的偏移，去除后有明显改善，但仍存在少许偏移。X/Ka 波段与 Gaia EDR3 共同源的 X 分布也没有其他两个波段的那样贴近瑞利分布，这与 ICRF3 X/Ka 波段与 S/X 波段参考架中共同源的位置差的分布情况类似，这种整体的偏移很可能是 X/Ka 波段中的系统误差导致的。

对 ICRF3 中三个波段的参考架之间的源位置进行比较后发现，有一定数量的源尽管去



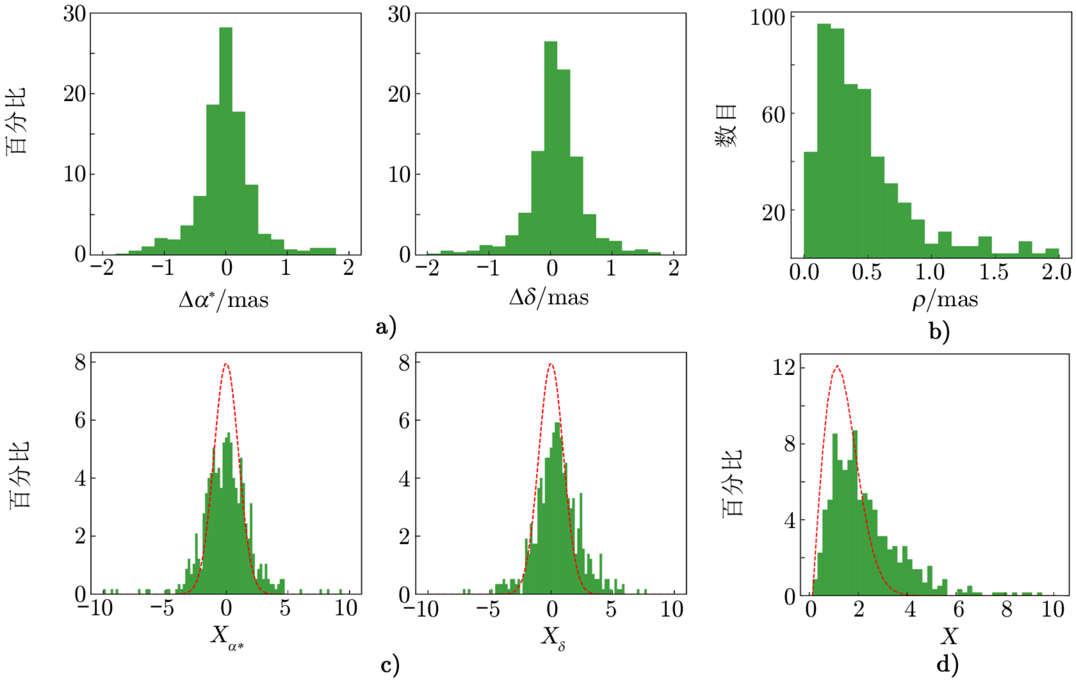
注：a)−d) 所示与图 11 相同。有部分位置误差较大的源超出了坐标轴的范围，a)−d) 内分别为 221、234 个，146 个，121、94 个和 194 个。

图 20　Gaia EDR3 与 ICRF3 S/X 波段参考架的共同源的位置差分布



注：a)−d) 所示与图 11 相同。有部分位置误差较大的源超出了坐标轴的范围，a)−d) 内分别为 21、22 个，38 个，11、6 个和 15 个。

图 21　Gaia EDR3 与 ICRF3 K 波段参考架的共同源的位置差分布



注：a)−d) 所示与图 11 相同。有部分位置误差较大的源超出了坐标轴的范围，a)−d) 内分别为 14、20 个，31 个，4、6 个和 12 个。

图 22 Gaia EDR3 与 ICRF3 X/Ka 波段参考架的共同源的位置差分布

除了两星表间的系统差，仍然有着较大的角距。这一现象在 ICRF3 与 Gaia EDR3 中类星体位置比较中更加明显，尤其在观测波段差别最大的 Gaia EDR3 与 ICRF3 X/Ka 波段位置比较中。可能导致较大角距出现的原因主要有五点[93]：

(1) 两星表中较大的位置误差；

(2) 观测源存在毫角秒量级的光学结构，如喷流；

(3) 由于不对称结构或明亮的宿主星系导致类星体在光学波段的观测位置发生偏移；

(4) 观测源存在射电波段的结构或者核移效应 (core-shift effect)；

(5) 引力透镜效应或双活动星系核 (dual AGNs) 的存在。

很多天文学家都对这些光学-射电位置差较大的源进行了研究[91, 93–98]。实际上只要是不同波段观测得到的源位置，都可以进行这样的比较研究。这类研究可以使人们更好地理解类星体等河外射电源的结构性质，从而有助于寻找位置和结构，用来建立和维持精度更高、更为稳定的参考架的源；更能加深我们对于多波段参考架之间的连接问题的理解。

与前代 Gaia 数据一样，EDR3 也将利用河外源位置建立一个光学波段的天球参考架[91, 99]。这一参考架利用 2 269 个 ICRF3 S/X 波段共同源来确定参考架指向，这些源的天体测量信息均利用五参数解得到。由于观测中的问题，Gaia 在亮端 ($G \lesssim 13$) 的参考架存在与暗端参考架不一致的情况。Gaia 工作组计划利用由依巴谷星表定义的参考架对其进行修正。Gaia-CRF3 与 ICRF3 的连接问题，也将成为非常重要的课题。

5 ICRF 的未来发展

ICRF3 发表后，对国际天球参考架的维持和改进工作仍未停止。本章，我们将对 ICRF3 中三个波段参考架的现状进行总结，并且对接下来可能采取的改进措施进行讨论。

ICRF3 三个波段中，S/X 波段拥有的观测站数量最多，积累的观测量也最大，观测时间跨度也最长。S/X 波段参考架中源密度领先于其他两个高频率参考架，与 Gaia EDR3 星表的吻合程度也最高。目前，S/X 波段参考架仍是三个波段中最可靠的一个。但由于南半球高纬度地区观测台站数量和观测时间的不足，导致 S/X 波段在纬度小于 $-40°$ 时源数目较少，位置精度也明显降低。此外，由于对流层建模的种种困难，S/X 波段参考架的精度也受到一定限制。提升 S/X 波段参考架质量的方法主要有四种[100, 101]。

(1) 提高 IVS 观测系统整体的码率。数据传输速率的提高可以提高观测的灵敏度，以便观测到更多暗源，增加源数目，尤其是和其他波段 ICRF 参考架以及 Gaia-CRF 的共同源数目，此外还能提高观测到的源位置精度。

(2) 优化观测计划。使更多的 IVS-CRF 和 IVS-CRDS 观测为天体测量方向进行优化而不是为测地方向，还希望可以在注重观测源位置的同时兼顾源的成像和对流层改正，并且将多个观测作为一个整体进行规划，以保证所有观测源都能得到足够的扫描次数。

(3) 通过 LBA (Australian Long Baseline Array) calibrator Survey (LCS) 等观测项目，增加南半球高纬度区域位置稳定的源的数量[102]。

(4) 为 IVS-CRF 和 IVS-CRDS 观测中的源提供多历元的成图信息，用来寻找结构稳定的点源，研究源的喷流方向等。

除了上面提到的问题，无线网络等在 S 波段带来的射频干扰 (Radio Frequency Interference, RFI) 以及较低频观测时河外源的结构问题，也给 S/X 波段观测带来困难。相比之下，K 波段频率更高，观测得到的像的结构更加紧凑，而且由于太阳等离子体效应 (solar plasmas effect) 与频率的平方成反比，K 波段观测能更加靠近太阳和银盘。此外，于 K 波段观测到的水蒸气脉泽还能用于研究银河系结构，如 BeSSeL Survey(Bar and Spiral Structure Legacy Survey)[103] 。

目前 ICRF3 K 波段参考架中源在天球上分布均匀；在解算时使用的观测数目仅约 50 万的情况下 (S/X 波段解算使用了约 1 300 万次观测) ，达到与 S/X 波段参考架相当的位置精度水平；主要观测网为 VLBA 阵列，可以获得高精度的成图资料，将源位置观测和成图观测结合起来，研究源的结构性质，提高参考架间连接精度。

但 K 波段观测也有受限之处。由于 K 波段观测是单波段观测，电离层改正需要依赖 GPS 技术，精度没有 S/X 波段那么高；而且由于位于南非的观测站观测数据不足，导致 K 波段参考架在赤纬小于 $-30°$ 时精度较差；另外，位于 22 GHz 的水蒸气辐射线也会增加K波段的系统误差；并且，更高波段的观测会使得对较暗源的观测更加困难。

在 K 波段未来发展中，将主要开展以下工作[103]：

(1) 致力于增加南北基线的数量；

(2) 增加拥有全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 信号接收器的台站；

(3) 提高电离层改正模型的质量，由原来的 2 h 间隔的二维模型进化成 15 min 间隔的三维模型；

(4) 提高天线的灵敏度来得到更暗源的观测数据，提高观测的精度。

X/Ka 波段比 K 波段频率更高，高频率带来的优势也更加明显：源结构给观测带来的影响更小；受太阳等离子体效应影响也更小，使得这一波段可以为轨道更加靠近太阳的卫星，如 Parker Solar Probe，进行追踪观测[104]。与 K 波段不同，X/Ka 波段是双波段观测，电离层改正不再依赖其他技术。

ICRF3 X/Ka 波段参考架中源在天球上位置分布均匀，解算使用的观测资料的数量也比较少，约 80 万。但由于星际介质散射的影响，其在银心附近源分布较稀疏。并且由于 X/Ka 波段观测台站只有 4 个，其中只有 1 个位于南半球 (阿根廷)，且它的观测时间远少于另外 3 个台站，导致 X/Ka 波段在南半球，尤其是 $-45^\circ \sim -60^\circ$ 区域的精度较差。南北基线上观测数目的欠缺还令 X/Ka 波段参考架中的源赤纬方向位置误差较大，参考架中也存在较为明显的区域误差。

在 X/Ka 波段未来的发展中，天文学家提出三项计划[104]：

(1) 提高现有台站的信噪比；

(2) 加入位于日本的新台站以增加基线数量，得到更好的台站分布；

(3) 更长期的规划中，还有可能将 X/Ka 波段加入到 VLBA 观测台站中，这样可以获得大量的新基线，提高获取观测数据的速率，甚至可能实现更多波段的同时观测，便于参考架之间的连接。

总的来说，增加台站，尤其是位于南半球的台站数量；更新观测仪器，提高仪器灵敏度；增加源的成图信息，加深对源结构的理解；提高对大气层等先验模型的建模水平，对 ICRF 未来的发展非常重要。除了 ICRF 自身的维持和改进，通过 ICRF 研究射电波段观测与光学、红外等其他波段观测得到参考架的连接问题也将是未来研究的重要课题。以此为基础，还可以开展河外射电源结构等建立在多波段观测上的研究。

参考文献：

[1] Fricke W, Schwan H, Lederle T, et al. Veroeffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg, 1988, 32: 1

[2] Kovalevsky J, Lindegren L, Perryman M, et al. A&A, 1997, 323: 620

[3] Ma C, Arias E F, Eubanks T M, et al. AJ, 1998, 116(1): 516

[4] Petit G, Luzum B. The 2010 reference edition of the IERS conventions[C]//Reference Frames for Applications in Geosciences. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 57

[5] Charlot P, Jacobs C S, Gordon D, et al. A&A, 2020, 644: A159

[6] Caprette D S, Ma C, Ryan J W. Crustal Dynamics Project Data Analysis. Washington: NASA, 1990: 1

[7] Sovers O J, Jacobs C S. Observation model and parameter partials for the JPL VLBI parameter estimation

software “MODEST”, California: JPL publication, 1996: 83
[8] Titov O, Tesmer V, Boehm J. IVS 2004 General Meeting Proceedings[J]. Washington: NASA, 2004: 267
[9] Kurdubov S. QUASAR software in IAA EOP service: Global Solution and Daily SINEX[C]. Boehm J, Pany A, Schuh H, eds. Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN, Heft. 2007: 79
[10] Böhm J, Böhm S, Boisits J, et al. PASP, 2018, 130: 044503
[11] Nilsson T, Soja B, Karbon M, et al. Earth Planets and Space, 2015, 67(1): 1
[12] Sovers O J, Fanselow J L, Jacobs C S. Reviews of Modern Physics, 1998, 70(4): 1393
[13] Gipson J. IVS 2006 General meeting proceedings. Washington: NASA, 2006: 286
[14] Romero-Wolf A, Jacobs C S, Ratcli J T. Effects of tropospheric spatio-temporal correlated noise on the analysis of space geodetic data[J]. http://hdl.handle.net/2014/42516, 2012
[15] Liu N, Lambert S B, Zhu Z. A&A, 2018, 620: A160
[16] Gipson J. Proceedings of the 18th European VLBI for geodesy and astrometry working meeting. Vienna: Inst. of the Course on “Geodesy and Geoinformation” of the Vienna University of Technology, 2007: 12
[17] Ryan J W, Ma C, Caprette D S. NASA Tech. Memo, 1993, 104572: 471
[18] Fey A L, Gordon D, Jacobs C S, et al. AJ, 2015, 150(2): 58
[19] Arias E F, Charlot P, Feissel M, et al. A&A, 1995, 303: 604
[20] Schlüter W, Behrend D. Journal of Geodesy, 2007, 81(6): 379
[21] Gontier A M, Ma C, Arias E F, et al. Advances in Space Research, 2002, 30(2): 185
[22] Fey A L, Ma C, Arias E F, et al. AJ, 2004, 127(6): 3587
[23] Standish E M. Highlights of Astronomy, Springer Dordrecht, 1998, 11(1): 310
[24] Folkner W M, Williams J G, Boggs D H. IPN progress report, 2009, 42(178): 1
[25] Fienga A, Manche H, Kuchynka P, et al. Planetary and lunar ephemerides INPOP10A[J]. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2010, 2011: 37
[26] 刘佳成, 朱紫. 天文学进展, 2012, 30(4): 411
[27] 乔书波, 李金岭, 孙付平, 等. 天文学进展, 2007, 25(2): 147
[28] European Space Agency. Hipparcos variability annex: periodic and unsolved variables and spectral types[M]. Paris: ESA Publ. Division, 1997: 10
[29] Liu J C, Zhu Z, Liu N. AJ, 2018, 156(1): 13
[30] Kovalevsky J. Hipparcos-Venice’97. 1997, 402: 11
[31] Lindegren L, Kovalevsky J. A&A, 1995, 304: 189
[32] Petrov L, Gordon D, Gipson J, et al. Journal of geodesy, 2009, 83(9): 859
[33] Ojha R, Fey A L, Johnston K J, et al. AJ, 2004, 127(6): 3609
[34] Fey A L, Ojha R, Jauncey D L, et al. AJ, 2004, 127(3): 1791
[35] Fey A L, Ojha R, Reynolds J E, et al. AJ, 2004, 128(5): 2593
[36] Ojha R, Fey A L, Charlot P, et al. AJ, 2005, 130(6): 2529
[37] Fey A L, Ojha R, Quick J F H, et al. AJ, 2006, 132(5): 1944
[38] Beasley A J, Gordon D, Peck A B, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2002, 141(1): 13
[39] Fomalont E B, Petrov L, MacMillan D S, et al. AJ, 2003, 126(5): 2562
[40] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E, et al. AJ, 2005, 129(2): 1163
[41] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E B, et al. AJ, 2006, 131(3): 1872
[42] Kovalev Y Y, Petrov L, Fomalont E B, et al. AJ, 2007, 133(4): 1236
[43] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E B, et al. AJ, 2008, 136(2): 580
[44] Liu J C, Capitaine N, Lambert S B, et al. A&A, 2012, 548: A50
[45] Malkin Z. MNRAS, 2014, 445(1): 845
[46] Sokolova Y, Malkin Z. IAG 150 Years. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2015: 41
[47] Lambert S. A&A, 2014, 570: A108
[48] Gaia C, Bono G. A&A, 2016, 595: 1
[49] Lindegren L, Hernández J, Bombrun A, et al. A&A, 2018, 616: A2

[50] Liu N, Lambert S B, Arias E F, et al. A&A, 2022, 659: A75
[51] Schuh H, Behrend D. Journal of geodynamics, 2012, 61: 68
[52] Nothnagel A, Artz T, Behrend D, et al. Journal of Geodesy, 2017, 91(7): 711
[53] Gordon D, Jacobs C, Beasley A, et al. AJ, 2016, 151(6): 154
[54] Le Bail K, Gipson J M, Gordon D, et al. AJ, 2016, 151(3): 79
[55] Plank L, Lovell J E J, McCallum J, et al. REFAG 2014: 129
[56] Plank L, Lovell J E J, McCallum J N, et al. Journal of Geodesy, 2017, 91(7): 803
[57] Lanyi G E, Boboltz D A, Charlot P, et al. AJ, 2010, 139(5): 1695
[58] Charlot P, Boboltz D A, Fey A L, et al. AJ, 2010, 139(5): 1713
[59] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E B, et al. AJ, 2011, 142(2): 35
[60] Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. JGR, 2016, 121(8): 6109
[61] Fey A L, Boboltz D A, Gaume R A, et al. AJ, 2001, 121(3): 1741
[62] Fey A L, Gordon D, Jacobs C S. IERS Technical Note No. 35, International Earth Rotation and Reference Systems Service[J]. 2009, 35: 75
[63] Collioud A, Charlot P. The Bordeaux VLBI image database[J]. 2008, 19: 19
[64] Fey A L, Kingham K A, Gaume R A. American Astronomical Society Meeting Abstracts# 192. 1998, 192: 13
[65] Reid M J, Brunthaler A. AJ, 2020, 892(1): 39
[66] Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. A&A, 2020, 641: A6
[67] Klioner S A, Mignard F, Lindegren L, et al. A&A, 2021, 649: A9
[68] 刘佳成, 刘牛. 天文学报, 2020, 61(1): 10
[69] Lieske J H, Lederle T, Fricke W, et al. A&A, 1977, 58: 1
[70] Capitaine N, Wallace P T, Chapront J. A&A, 2003, 412(2): 567
[71] Mathews P M, Herring T A, Buffett B A. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107
[72] Malkin Z M. Astronomy Reports, 2011, 55(9): 810
[73] Kovalevsky J. A&A, 2003, 404(2): 743
[74] Vallée J P. New Astronomy Reviews, 2017, 79: 49
[75] Fanselow J L. NASA contractor report, NASA CR-173455.California: JPL publication, 1983: 83
[76] Xu M H, Wang G L, Zhao M. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(2): 329
[77] Titov O, Lambert S. A&A, 2013, 559: A95
[78] Titov O, Krásná H. A&A, 2018, 610: A36
[79] Reid M J, Menten K M, Zheng X W, et al. AJ, 2009, 700(1): 137
[80] Brunthaler A, Reid M J, Menten K M, et al. Astronomische Nachrichten, 2011, 332(5): 461
[81] Honma M, Nagayama T, Ando K, et al. PASJ, 2012, 64(6): 136
[82] Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al. AJ, 2014, 783(2): 130
[83] Titov O, Lambert S B, Gontier A M. A&A, 2011, 529: 91
[84] MacMillan D, Fey A, Gipson J, et al. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, US: NASA, 2019: 163
[85] MacMillan D S, Fey A, Gipson J M, et al. A&A, 2019, 630: A93
[86] Bahcall J N, Bahcall S. Nature, 1985, 316(6030): 706
[87] Fouqué P, Solanes J M, Sanchis T, et al. A&A, 2001, 375(3): 770
[88] Mignard F, Klioner S. A&A, 2012, 547: A59
[89] Gaia C, Brown A G A, Vallenari A, et al. A&A, 2018, 616(1)
[90] Mignard F, Klioner S, Lindegren L, et al. A&A, 2016, 595: A5
[91] Lindegren L, Klioner S A, Hernández J, et al. A&A, 2021, 649: A2
[92] Lindegren L, Bastian U, Biermann M, et al. A&A, 2021, 649: A4
[93] Kovalev Y Y, Petrov L, Plavin A V. A&A, 2017, 598: L1
[94] Petrov L, Kovalev Y Y. MNRAS, 2017, 467(1): L71
[95] Petrov L, Kovalev Y Y, Plavin A V. MNRAS, 2019, 482(3): 3023

[96] Plavin A V, Kovalev Y Y, Pushkarev A B, et al. MNRAS, 2019, 485(2): 1822
[97] Kovalev Y Y, Zobnina D I, Plavin A V, et al. MNRAS: Letters, 2020, 493(1): L54
[98] Liu J C, Liu N. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2020, 44(2): 131
[99] Klioner S A, Mignard F, Lindegren L, et al. A&A, 2021, 649: A9.
[100] de Witt A, Le Bail K, Jacobs C, et al. http://hdl.handle.net/2014/48802, 2018
[101] de Witt A, Basu S, Charlot P, et al. 25th Working Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astrometry (EVGA). https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/48802, 2021
[102] Petrov L, Phillips C, Bertarini A, et al. MNRAS, 2011, 414(3): 2528
[103] de Witt A, Jacobs C S, Gordon D, et al. Proc. Journeés 2019, 2019: 2
[104] Jacobs C S, Samoska L, Kooi J, et al. Proc. Journeés 2019, 2019: 1

An Introduction of the 3rd Realization of the International Celestial Reference Frame (ICRF3)

JIANG Nan[1,2], LIU Jia-cheng[1,2], ZHU Zi[1,2], LIU Niu[1,2,3]

(1. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics (Ministry of Education), Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The 3rd realization of the International Celestial Reference Frame, ICRF3, has been the latest ICRF (the International Celestial Reference Frame) as the replacement of its previous realization, ICRF2, since January 1, 2019. The ICRF3 is aligned to the ICRS (the International Celestial Reference System) to within the accuracy of the ICRF2. After its publication, the ICRF3 has played a vital role in many scientific disciplines.

The ICRF3 has some largely improved characteristics compared to the ICRF1 and the ICRF2: (1) In addition to the traditional S/X band (8.4 / 2.3 GHz) reference frame, the ICRF3 also contains two higher frequency band frames, namely K band (24 GHz) and X/Ka band (8.4 / 32 GHz). (2) The ICRF3 is the first reference frame that considers the influence of the Galactic aberration effect, and reports the source position at the epoch of 2015.0.

Having an overall understanding of the ICRF3, especially its new features, is very important for using it correctly. In this paper, we introduce the basic information of the ICRF3 in detail, and offer guidelines for users. We also provide comparisons between the different band frames of the ICRF3, and between the ICRF3 and the Gaia-CRF3. Through the comparisons of different catalogues, we test the stability of the ICRF3, and discuss the systematic errors in it.

Key words: reference systems; interferometric; Galaxies; proper motion